

Schriftenreihe des Bundesministers für
**Raumordnung,
Bauwesen und Städtebau**



Bau- und Wohnforschung



Brandversuche Lehrte



04.037

In der Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung“ werden Forschungsberichte des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau herausgegeben. Die von den Verfassern ausgearbeiteten Forschungsberichte werden unverändert übernommen. Sie geben nicht unbedingt die Meinung des Herausgebers wieder. Die Hefte der Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung“ werden in begrenzter Anzahl an interessierte Fachkreise abgegeben. Der Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Deichmanns Aue, 5300 Bonn-Bad Godesberg.

04.037

Brandversuche Lehrte

1978

**Brandversuche an einem zum Abbruch bestimmten,
viergeschossigen modernen Wohnhaus in Lehrte.**

**Im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, durchgeführt vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Direktor: Prof. Dr. Ing. K. Kordina, Institut für Wärmetechnik und Industrieofenbau, Technische Universität Clausthal, Direktor: Prof. Dr. Ing. R. Jeschar
Bearbeiter: Dr. Ing. Rolf Bechtold, Dr. Ing. Klaus-Peter Ehlert, Dipl.-Ing. Jürgen Wesche.**

Forschungsauftrag des Innenministers des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf,
Az.: VI C 5 – 0221.302 – und des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau,
Bonn, Az.: B I 7 – 810705.

Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemeines	7
2.	Beschreibung des Versuchshauses	7
3.	Ziele der Untersuchungen, Überblick über das Versuchsprogramm und Organisation der Versuchsdurchführung	10
4.	Brandlasten und Brandbelastung des Gebäudes, Zündung und Ablauf der Brände, Ventilationsbedingungen, Meteorologische Randbedingungen.	12
5.	Gewählte Meßverfahren und eingesetzte Meßgeräte	15
6.	Ergebnisse der thermischen Untersuchungen	21
6.1.	Brandentwicklung und Brandausbreitung im Gebäude	21
6.1.1.	Die Temperaturentwicklung	21
6.1.2.	Entwicklung, Verteilung und Zusammensetzung der Rauchgase (Gasanalyse)	32
6.1.3.	Kalorimetrische Messung von Wärmestromdichten	36
6.1.4.	Luftdruckdifferenzen zwischen Brandraum und der vom Feuer nicht beeinflussten Umgebung	36
6.1.5.	Wertung der Ergebnisse	38
6.2.	Brandentwicklung und Brandausbreitung vor der Fassade	38
6.2.1.	Allgemeines	38
6.2.2.	Temperaturentwicklung und Temperaturverteilung vor der Fassade	39
6.2.3.	Geschwindigkeit und Richtung der Heißgase vor der Fassade	45
6.2.4.	Geometrie des Temperatur- und Strömungsfeldes vor der Fassade	47
6.2.5.	Windeinflüsse	47
6.2.6.	Wärmeinhalt der aus dem Brandraum ausströmenden Heißgase	51
6.2.7.	Über den Mechanismus der Brandübertragung entlang der Gebäudeaußenfront	52
7.	Untersuchungen an Innenbauteilen	57
7.1.	Untersuchungen an durchlaufenden Stahlbetonplatten	57
7.1.1.	Allgemeines	57
7.1.2.	Versuchsprogramm und Beschreibung der Deckensysteme	57
7.1.3.	Versuchsdurchführung, Meßprogramm	61
7.1.4.	Darstellung der Meßergebnisse	62
7.1.5.	Vergleich der Ergebnisse mit Versuchsergebnissen an Plattenstreifen (Laborversuche)	67
7.1.6.	Wertung der Versuchsergebnisse	70
7.1.7.	Modellvorstellungen über Tragmechanismen	71
7.1.8.	Konstruktionsvorschläge für Durchlaufplatten	73
7.1.9.	Zusammenfassung	74
7.2.	Lastabtragung auf „nichttragende Wände“	74
7.2.1.	Allgemeines	74
7.2.2.	Versuchsprogramm	74
7.2.3.	Versuchsaufbau	75
7.2.4.	Darstellung der Meßergebnisse	76
7.2.5.	Wertung der Versuchsergebnisse	76
7.3.	Untersuchungen an Unterdecken	79
7.3.1.	Allgemeines	79
7.3.2.	Versuchsaufbau	79
7.3.3.	Darstellung der Meßergebnisse	79
7.3.4.	Wertung der Versuchsergebnisse	84
7.4.	Untersuchungen an Brandschutztüren, an einer Rauchabzugs- klappe, an Glasfasergardinen und Vergleichsbauteilen. Weitere allgemeine Beobachtungen	86
8.	Untersuchungen an Außenbauteilen	91
8.1.	Thermische Beanspruchung der Außenbauteile	91
8.2.	Brandverhalten der Gebäude-Außenwand	94
8.3.	Brandverhalten der vorgehängten Kunststofffassade	96
8.4.	Brandverhalten der Außenstützen	98
8.5.	Untersuchungen an den Balkonplatten aus Stahlbeton und der Brüstungen aus einer Aluminiumlegierung	103
9.	Schrifttum	107
10.	Anhang Einzelmeßergebnisse	109

1. Allgemeines

Durch systematisches Suchen ist es dem Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig gelungen, ein modernes zum Abbruch bestimmtes Gebäude zu finden, an dem eine Reihe von Brandversuchen durchgeführt werden konnte. Die Ergebnisse dieser Versuche sollten eine Ergänzung der vorhandenen Kenntnisse des Brandverhaltens von Bauteilen unter Normbedingungen darstellen. Zudem sollten sie Aufschluß über solche Fragestellungen geben, die bei Modellversuchen unter Normbrandbedingungen nicht studiert werden können. Mit den neuen Versuchsergebnissen sollten Daten und Erfahrungen gezeigt werden, die von unmittelbarem Nutzen bei der Erarbeitung praxisgerechter Vorschriften und Normen auf dem Gebiet des baulichen Brandschutzes sind. Das gesamte Vorhaben wurde unter zwei Hauptblickrichtungen durchgeführt. Dies waren:

1. Brandentwicklung und Brandausbreitung in einem mehrgeschossigen Gebäude.
2. Brandverhalten von Bauteilen in praxisgerechtem Einbaustand.

Den verschiedenen Interessengebieten entsprechend wurden die Untersuchungen zum letztgenannten Thema vom Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, und die erstgenannten Untersuchungen vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, finanziell gefördert. Die Versuche wurden gemeinsam vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig und dem Institut für Wärmetechnik und Industrieofenbau der Technischen Universität Clausthal durchgeführt.

Die Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche wurde in Abstimmung mit einem Beraterkreis vorgenommen, der sich aus folgenden Personen zusammensetzte:

Dipl.-Ing. W. Becker, Im Kästenbusch 15, 6750 Neustadt/Weinstr.-Hambach

Dr.-Ing. Bongard, Deutscher Stahlbau-Verband, Ebertplatz 1, 5000 Köln

Min.-Rat Dr.-Ing. Ehm beim Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Deichmanns Aue 6, 5300 Bonn 2

Dr. Esser i. Fa. Röhm GmbH, Mainzer Straße 42, 6100 Darmstadt

Baudirektor Dipl.-Ing. Hertel, Institut für Bautechnik, Reichpietschufer 72 – 76, 1000 Berlin 30

Oberreg.-Rat Dipl.-Ing. Klingelhöfer, Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Marsbruchstr. 186, 4600 Dortmund-Aplerbeck

Reg.-Baudirektor A. Klose, Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen, Karltor 8, 4000 Düsseldorf

Dr.-Ing. Seiler, Deutscher Beton-Verein e. V., Bahnhofstr. 61, 6200 Wiesbaden

Die Detailplanung der Versuche erfolgte in der Zeit vom August 1973 bis Juli 1974. Die Arbeiten im Brandhaus, die Versuche und die notwendigen Aufräumarbeiten wurden von Anfang August bis Mitte November 1974 durchgeführt. Die detaillierte Auswertung der Versuche wurde im Dezember 1976 abgeschlossen.

Der Ergebnisbericht über die Untersuchungen besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil sind die neuen wesentlichen Erkenntnisse dargestellt und eingehend kommentiert. Im

zweiten Teil (Anhang) sind die Einzelmeßergebnisse wiedergegeben. Sie sind in der Reihenfolge der Versuche geordnet. Die Einzelergebnisse eines Versuchs sind – der Gliederung der Kapitel 6, 7 und 8 entsprechend – dargestellt.

2. Beschreibung des Versuchshauses

Das zur Verfügung stehende Haus wurde 1962 erstellt und nach den Brandversuchen im Dezember 1974 wegen einer geplanten Straßenumlegung abgerissen.

Das Haus bestand aus zwei Gebäudeteilen; eine Dehnfuge trennte die beiden Gebäudehälften. Die Umfassungswände und die tragenden Innenwände waren aus Bimsbeton-Hohlsteinen Hbl 25 bzw. Mauerziegeln der Steingüte 150 gemauert und 30 cm bzw. 24 cm dick. Die 14 cm dicken Stahlbetondecken waren als quer zur Hausachse gespannte Durchlaufsysteme über zwei Feldern gerechnet und bewehrt. Die Wohnungstrennwände zwischen Raum 1 und Raum 2 (Bild 2–1) waren aus 24 cm dicken Vollziegeln gemauert. Die Trennwände zwischen Raum 1 und Raum 2, zwischen Raum 3 und Raum 4 und Raum 4 und Raum 6 waren in der statischen Berechnung so angesetzt, daß sie von der Decke keine Last abzutragen hatten. Diese Wände waren aus 11,5 cm dickem Kalksandleichtstein-Mauerwerk hergestellt. Das Versuchshaus war innen mit einem planmäßig 1 cm dicken Kalkzementputz versehen. Die tatsächlich festgestellten Putzdicken beliefen sich auf 0,6 bis 1,8 cm. Auf die Stahlbetondecken war ein schwimmender Estrich (d = 5 cm) als Trittschalldämmung aufgebracht. Der Außenputz des Gebäudes war ca. 2 cm dick und auf Kalk-Zement-Basis unter Verwendung von grobkörnigem Sand hergestellt.

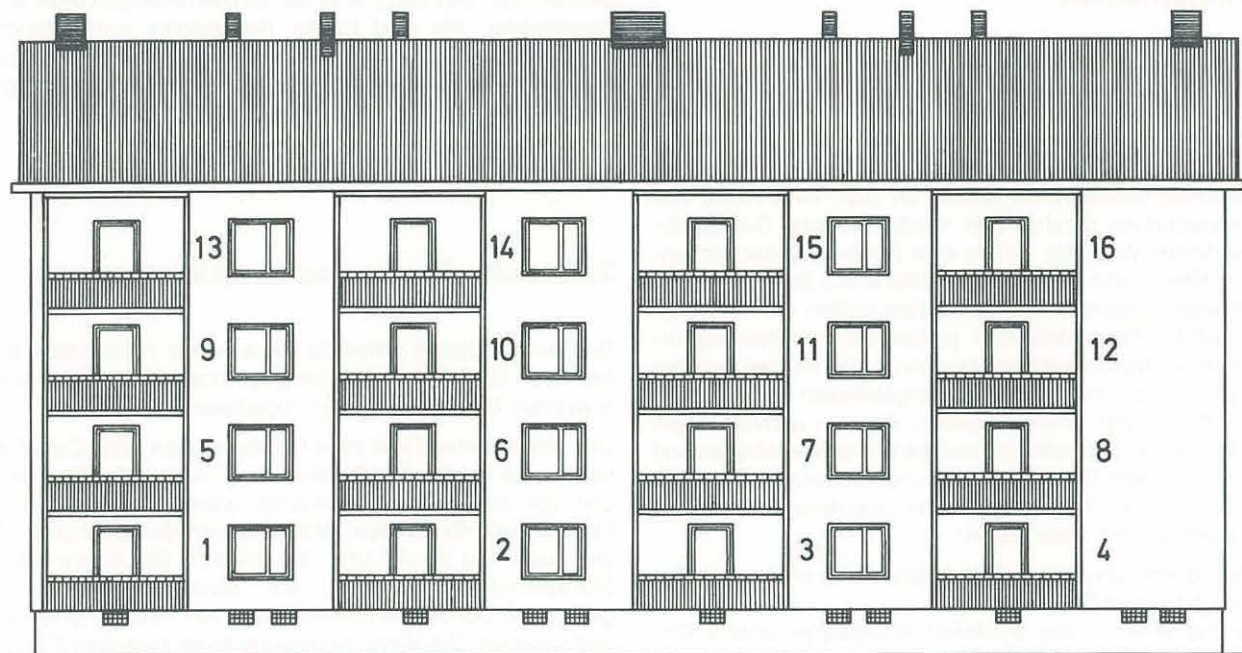
Die Treppenhäuser waren jeweils in der Mitte der Gebäudehälften angeordnet. Sie gingen vom Keller bis zum Dachgeschoß ohne Abschottung durch. Die Treppenläufe und Podeste aus Stahlbeton waren mit Kunststeinstufen belegt. Ebenso wie alle Türen innerhalb der Wohnungen waren auch die Türen zwischen Flur (Raum 3) und Treppenhaus aus Holz.

Der Dachstuhl des Gebäudes war aus Holz (Kehlbalkenkonstruktion) und als Hartdach (Ziegel) eingedeckt.

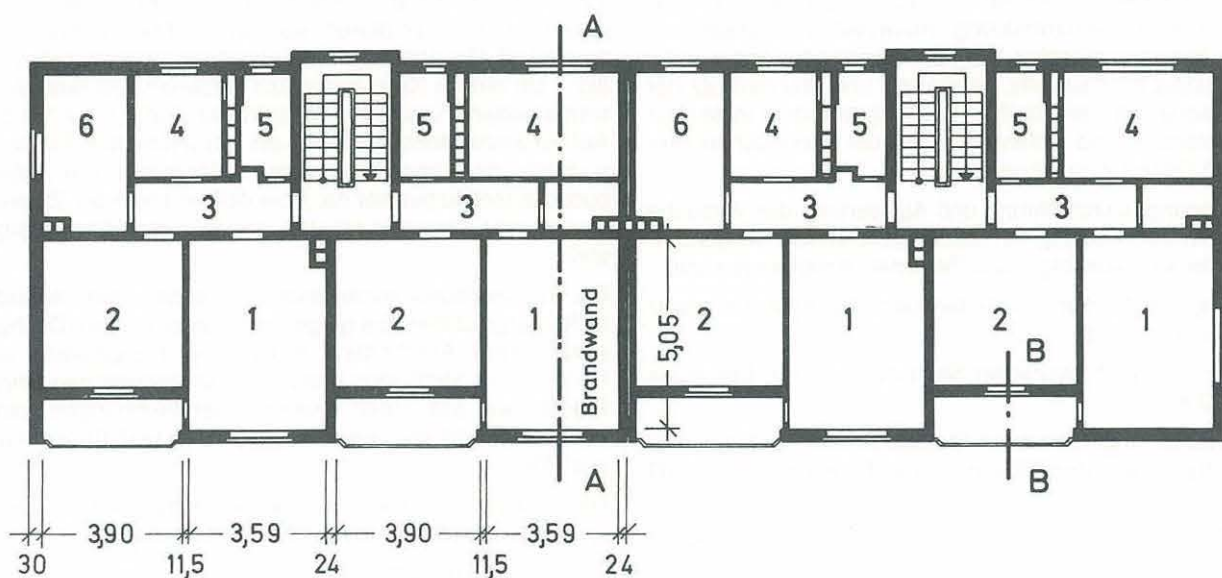
Vor Beginn der Versuche wurden die Dachtraufe der Nord- und Südseite des Gebäudes mit Asbestsilikatplatten der Firma Promat, Düsseldorf, bekleidet, um ein mögliches Übergreifen des Feuers auf den hölzernen Dachstuhl zu verhindern.

Zwischen den Räumen 4 und 5 (Küche, Bad – WC) waren Lüftungsschächte eingebaut, die ebenso wie die Schornsteine vom Keller bis über das Dach hinaus durchgingen. Weitere Einzelheiten des Hauses können Bild 2–2 entnommen werden und sind in den Kapiteln, wo sie von Bedeutung sind, erwähnt.

Die in Bild 2–1 vorgenommene Numerierung der Wohnungen und Räume wurde willkürlich gewählt und wird in dem gesamten Bericht einschließlich der Anlagen beibehalten.



Ansicht Südseite

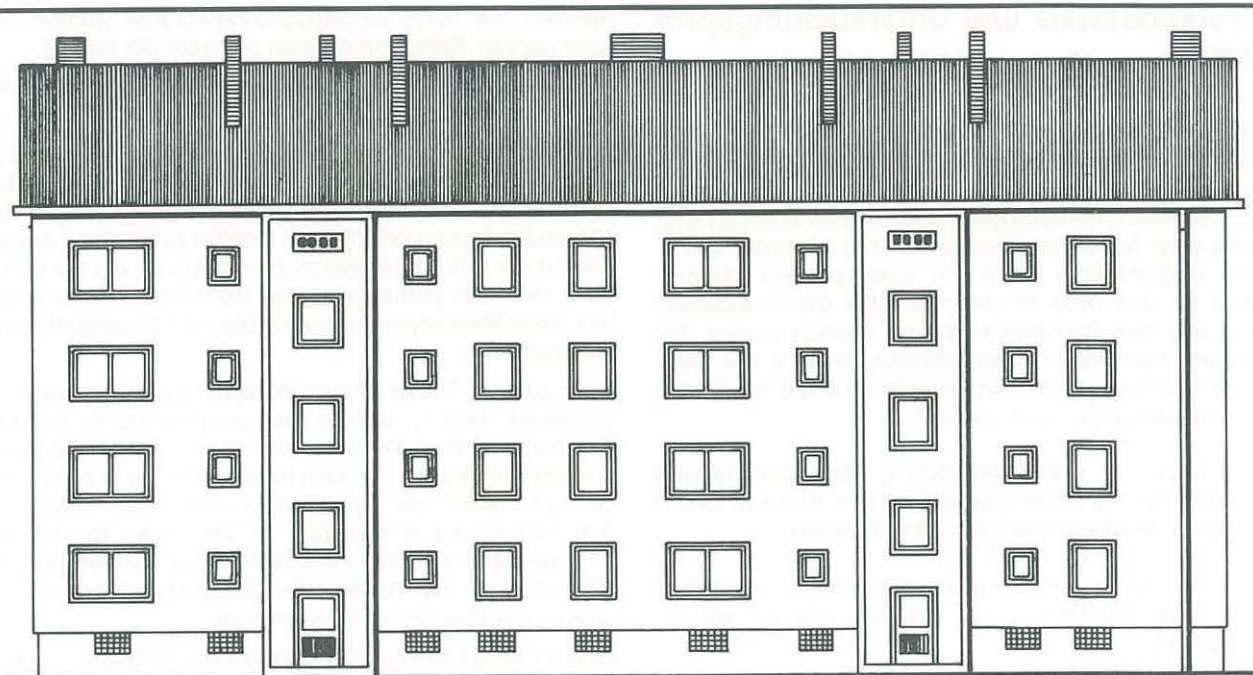


Grundriß

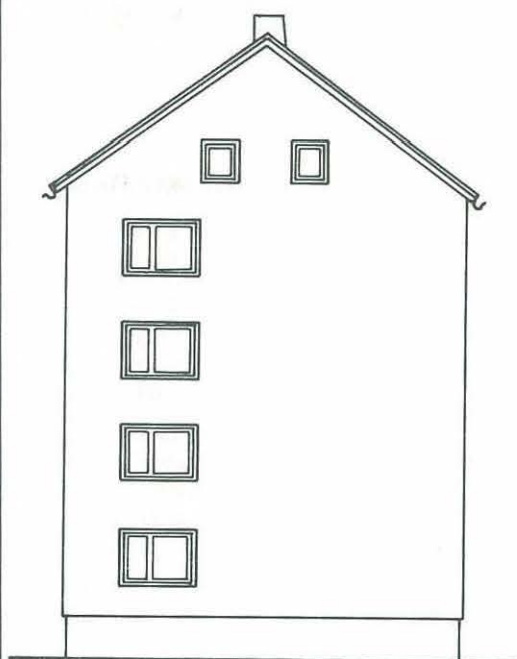
- 1 Wohnzimmer
- 2 Schlafzimmer
- 3 Flur
- 4 Küche bzw. Wohnküche
- 5 Bad und WC
- 6 Kinderzimmer

Raum Nr.	Fenstermaße		Türmaße	
	b [m]	h [m]	b [m]	h [m]
1	1,76	1,51	0,88 ⁵	1,90
2	1,26	1,51	0,88 ⁵	1,90
3	—	—	0,88 ⁵	1,90
4 a	1,13 ⁵	1,38 ⁵	0,88 ⁵	1,90
4 b	2,13 ⁵	1,38 ⁵	0,88 ⁵	1,90
5	0,76	0,88 ⁵	0,88 ⁵	1,90
6	1,13 ⁵	1,38 ⁵	0,88 ⁵	1,90

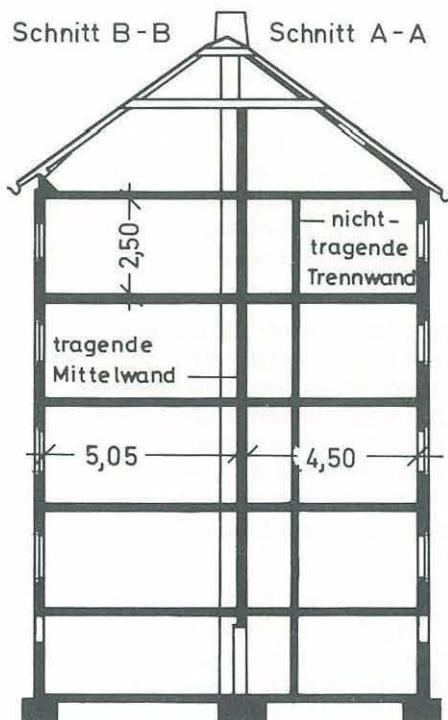
Bild 2-1 Ansicht u. Grundriß des Versuchshauses



Ansicht der Nordseite



1.) Ansichten der Giebelseiten



2.) Schnitt A-A durch Raum 1 und 4



3.) Schnitt B-B durch Raum 2 (Balkone)

Bild 2-2 Ansichten und Schnitte des Versuchshauses

3. Versuchsziele und Untersuchungsprogramm

Das zur Verfügung stehende Gebäude gestattete es, Brände mit Brandbelastungen einzelner Räume bis zu 90 kg Holz/m² bei optimalen Belüftungsbedingungen – also maximal zu erwartendem Brandgeschehen – ablaufen zu lassen bzw. thermische Belastungen durch Ölfeuer aufzubringen, welche einer Normbranddauer bis zu 120 min entsprachen. Diese Möglichkeiten ließen ein umfangreiches Meßprogramm zu, das neue Erkenntnisse über den Brandablauf selbst und das Brandverhalten von Bauteilen unter den Gegebenheiten, die in einem üblichen Bauwerk des allgemeinen Hochbaus herrschen, brachte. Im einzelnen wurden folgende Messungen durchgeführt:

Versuchsziel 1: Brandentwicklung, Brandausbreitung im Gebäude und Feuerübersprung von einem in Brand geratenen Stockwerk auf das nächsthöhere

- 1.1. Aufzeichnung der Temperaturzeitverläufe in charakteristischen Punkten in den Brandräumen und vor der Fassade
- 1.2. Analyse der Rauchgase
- 1.3. Bestimmung der Wärmestromdichten, die vom Feuer an ein Kalorimeter abgegeben wurden, als Maß für die Intensität des Brandes
- 1.4. Messung des Luftdruckes in den in Brand geratenen Räumen selbst, aber auch in den nebenliegenden Räumen
- 1.5. Ermittlung der Heißgasströmungsgeschwindigkeit im Bereich der Brandraumöffnungen und im vor der Gebäudefront aufsteigenden Heißgasstrom

Es sollten Möglichkeiten zur Verknüpfung von natürlichen Brandabläufen mit Normbränden, wie sie von H. Ehm [1], H. J. Wierig [2] und E. Knublauch [3] aufgezeigt wurden, überprüft werden. Ebenso sollte eine Beziehung zu den in Metz [4, 5] und Boreham Wood [6] durchgeführten Versuchen hergestellt werden.

Bisher waren keine Meßergebnisse bekannt, die die Brandentwicklung und Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung in einem neuzeitlichen Massivbau beschreiben. Beschrieben werden ähnliche Versuche von S. Gripas und Y. Povzik [7], ohne jedoch die genauen Versuchsparameter anzugeben. Von Modellbränden berichtet A. J. Pryor [8], und R. Baldwin und P. H. Thomas [9] machen Angaben über die Brandausbreitung, die auf statistischen Untersuchungen der Feuerwehr beruhen.

Bekannt hingegen sind eine Reihe von Meßergebnissen über die Brandentwicklung und Brandausbreitung in Einzelräumen (4 bis 6, 10 bis 16). Die Verfasser weiterer Veröffentlichungen [17 bis 20] befassen sich mit Sonderproblemen der Brandausbreitung in Gebäuden. Eine theoretische Studie über die Brandausbreitung in Gebäuden stammt von einem spanischen Verfasser [21]. Diese Angaben reichen jedoch nicht aus, um die Brandausbreitung in Wohnungen zu beschreiben und um eine Beziehung zur Normbranddauer herzustellen. Es war daher beabsichtigt, Brandversuche in einer Wohnung durchzuführen, bei denen die Brandentwicklung und Brandausbreitung durch mehrere Räume, die durch einen Flur miteinander verbunden sind, zu untersuchen. Die Brandlast sollte natürlichen Gegebenheiten entsprechen, d. h. es wurden Versuche mit normalem Wohnungs- und Büromöbiliar durchgeführt. Dabei wurde die „Ermittlung von Brandlasten in Bürogebäuden“ von Czech [22] berücksichtigt. Weitere Angaben über die Brandlast in

Räumen und deren Abbrandgeschwindigkeit werden von einer ganzen Reihe von Autoren gemacht [23 bis 26].

Ferner war vorgesehen, an den Ventilationsöffnungen die Luftströme nach Größe und Richtung zu bestimmen.

Während des gesamten Brandablaufs sollte die Konzentration von CO und CO₂ an drei charakteristischen Stellen gemessen werden, um hieraus erste Anhaltswerte für das Abbrandverhalten von üblichem Mobiliar zu erhalten. Außerdem ist die CO-Konzentration interessant für die zur Verfügung stehende Rettungszeit von Menschen. Ferner erlauben diese Messungen Aussagen über die Sauerstoffzufuhr zur Brandstelle.

Auch zu dem Thema „Feuerübersprung von Stockwerk zu Stockwerk“ sind nur wenige Versuche bekannt. W. Schütze [10] berichtet über Versuche, die an einem alten Gebäude durchgeführt wurden. Es kam hierbei aber nur in einem Fall zur Entzündung der Brandlast in dem Raum über dem Brandentstehungszimmer [27]. In Versuchen im Maßstab 1 : 1 zu diesem Thema untersucht A. W. Moulen [27] die Mindestbreite von horizontalen Schutzvorrichtungen, um einen Feuerüberschlag zu verhindern.

Es war geplant, hierzu an dem modernen Gebäude in Lehrte Versuche durchzuführen und dabei insbesondere die Wirkung der ausragenden Balkonplatten auf den Feuerüberschlag zu untersuchen. Dabei sollte sowohl in den Räumen der beiden übereinander liegenden Wohnungen als auch an der Außenfassade eine Vielzahl von Temperaturmessungen durchgeführt werden. Auch hierbei sollten die Luftströme an den Ventilationsöffnungen und die Konzentration von CO und CO₂ in den Räumen wieder gemessen werden.

Versuchsziel 2: Brandverhalten von Bauteilen in praxisgerechtem Einbauzustand

- 2.1. Brandverhalten von Stahlbetonplatten unter natürlichen Lagerungsbedingungen
 - 2.1.1. Messung der Durchbiegung und der Horizontaldehnung der Decken in Abhängigkeit von der Branddauer und der Brandintensität.
 - 2.1.2. Ermittlung der brandbedingten Lastumlagerungen durch Messung der Stahlspannungen über dem Mittelaufleger durchlaufender Platten und der Messung der Auflagerreaktionen über „nichtbelasteten Wänden“.
 - 2.1.3. Beobachtung der sich im Verlauf des Brandes auf der Plattenoberseite einstellenden Risse.
 - 2.1.4. Messung der Temperaturen auf der dem Feuer abgekehrten Plattenoberseite.
- 2.2. Messung der Belastung von im Gebrauchszustand nichttragenden Wänden infolge brandbedingter Durchbiegung der darüber liegenden Decken.
- 2.3. Überprüfung des Brandverhaltens von Brandschutztüren (Türen mit amtlichem Prüfzeugnis) in praxisgerechtem Einbauzustand und unter den Bedingungen eines Gebäudebrandes.
- 2.4. Beobachtung des Brandverhaltens einer vorgehängten Kunststoffassade.
- 2.5. Messung des Luftdruckes und der Temperaturen im Hohlraum zwischen der Stahlbetondecke des Gebäudes und abgehängten Unterdecken verschiedener Bauart.

- 2.6. Beobachtung und Messung der Verschiebung und Rißbildung des Gebäudeteils, in dem der jeweilige Brand abläuft.
- 2.7. Ermittlung der Temperaturerhöhung von Vergleichselementen (Bauteilausschnitten) zur Bestimmung des Unterschieds der Brandbeanspruchung eines Bauteils durch den Normbrand nach DIN 4102 und durch einen natürlichen Brand.

Die bisher durchgeführten Versuche mit Stahlbetonplatten unter Brandbeanspruchung wurden mit statisch nachweisbaren, klar definierten Randbedingungen im Labor als Einzelbauteil in Anlehnung an DIN 4102 durchgeführt. Verglichen mit den Versuchsergebnissen dieser Brandversuche konnte bei vielen natürlichen Bränden ein wesentlich besseres Tragverhalten der Stahlbetonplatten beobachtet werden, das auf zusätzliche Tragreserven im Einbauszustand schließen läßt. Der Einfluß von konstruktiven Einspannungen und Dehnungsbehinderungen, vom konstruktiven Querabtrag und von statisch nicht berücksichtigten Zwischenauf lagern wurde bisher bei der Beurteilung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Stahlbetondecken außer acht gelassen.

Deshalb sollte bei der Durchführung der Brandversuche auch ein umfangreiches Meßprogramm an den Stahlbetondecken ablaufen, das zumindest qualitative Analysen erwarten ließ. Eine wesentliche Steigerung der Aussagefähigkeit dieser Versuchsreihe ermöglichten die drei Brandversuche (Versuch 9 bis 11) in Anlehnung an die Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102 [28], zumal die Versuchsergebnisse mit gleichzeitig durchgeführten Laborversuchen an durchlaufenden Stahlbetonplattenstreifen mit gleichen Stützweiten und Bewehrungsverhältnissen verglichen werden konnten.

Die Messungen von brandbedingten Zusatzbelastungen auf statisch gesehen „nichttragende Wände“ hatten das Ziel, die Normenpraxis zu überprüfen, die bei der brandschutztechnischen Klassifizierung von „nichttragenden Wänden“ Brandversuche an unbelasteten Konstruktionen zugrunde legt und unter Umständen Alternativlösungen für die Normung vorzuschlagen.

Der nachträgliche Einbau von Unterdecken und Türen sollte im wesentlichen der Erforschung des Brandverhaltens dieser Bauteile im praxisgerechten Einbauszustand bei einem natürlichen Gebäudebrand dienen. Im Hinblick auf die nationale und internationale Normung wurden insbesondere die Druckverhältnisse im Brandraum und im Zwischendeckenbereich untersucht, da sie einen entscheidenden Einfluß auf die Wirksamkeit von Unterdecken als Brandschutzbekleidung haben.

Versuchsziel 3: Brandverhalten von Stahl und Stahlbetonaußenstützen

- 3.1. Ermittlung der Temperaturerhöhungen an der Oberfläche der Stahl- und Stahlbeton-Außenstützen und Ermittlung der Temperaturerhöhungen der Bewehrung und einzelner Punkte im Querschnitt der Betonaußenstützen.
- 3.2. Bestimmung der brandbedingten Verformungen (Verlängerungen und Verkrümmungen) der frei verformbar aufgestellten Außenstützen.
- 3.3. Bestimmung des Ausmaßes der thermisch geschädigten Zone („zermürbte Schicht“) der Betonaußenstützen.

Die Versuche von Boreham Wood [6] und Metz [5] ließen

erkennen, daß die Brandbeanspruchung von Außenbauteilen – speziell auch von Außenstützen – erhebliche Ausmaße annehmen kann. Bei beiden Versuchsbrandhäusern standen die Außenstützen jedoch mit einem geringen Abstand von der Frontwand, so daß angenommen werden mußte, daß diese zwar in Höhe der Brandraumöffnung mit großer Intensität beflammt wurden, jedoch in Höhe des über dem Brandraum liegenden Geschosses die Feuereinwirkung größer gewesen wäre, wenn die Stütze im Zentrum der vor der Fassade aufsteigenden Flammen und Rauchgase gestanden hätte. Deshalb sollten, nachdem aus den Vorversuchen 01 und 02 die Ausdehnung des Temperaturfeldes vor der Fassade ungefähr bekannt war, Außenstützen mit größerem Abstand zur Fassade ($d \approx 40$ bis 80 cm) in der Mittelebene der Brandraumfenster aufgestellt werden.

Da bisher nur das Brandverhalten von Außenstützen aus Stahl mit vorwiegend I-Querschnitt untersucht wurde, die Wärmeübergangsbedingungen von einem Feuer auf Bauteile jedoch erheblich von deren Form und Baustoff abhängen, sollten auch Stützen mit quadratischem Querschnitt (Stahlrohr- und Betonstützen) zum Einsatz kommen. Außerdem sollte auch die Wirkung der über dem Brandraum horizontal auskragenden Platten auf die Temperatur und Führung der Flammen und Rauchgase untersucht werden. Um nun Meßdaten zu bekommen, die allgemein Aufschluß über das Brandgeschehen vor der Fassade geben können, d. h. deren Aussagewert nicht nur auf die am Versuchshaus herrschenden Bedingungen beschränkt bleibt, sollte der Ausmessung des Temperatur- und Strömungsfeldes vor der Fassade große Aufmerksamkeit geschenkt werden. Weiter sollte die Wirkung der aus dem Gebäude herausschlagenden Flammen auf die Gebäudeaußenwand (Massivwand) untersucht werden, da hierüber nur wenige Kenntnisse vorliegen.

Ebenso sollte die Gelegenheit genutzt werden, um das Brandverhalten einer drei Geschosse hohen vorgehängten Kunststoffassade unter praxisnahen Bedingungen zu testen.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über das gesamte Versuchsprogramm. Die Versuche 01 und 02 wurden als „Vorversuche“ geplant. Es wurden zwei Räume mit kleiner Grundfläche und kleinen Fensteröffnungen im Erdgeschoß gewählt, um mit möglichst wenig Aufwand die eingesetzten Meßgeräte auf ihre Zweckmäßigkeit und Funktionstüchtigkeit im Feldversuch zu überprüfen und zum anderen das Verhalten des Gebäudes unter der Wirkung eines Brandes von durchschnittlicher Intensität, jedoch kurzer Dauer kennenzulernen. Die räumliche und zeitliche Koordinierung der Hauptversuche wurde unter folgenden Gesichtspunkten durchgeführt:

Der Einfluß der Versuchsbrände auf die Standsicherheit des Gebäudekomplexes sollte klein gehalten werden. Deshalb sollten die Versuche mit kleinen Brandbelastungen zu Beginn der Serie und Versuche mit langdauernden Bränden bzw. Beheizung der Brandräume mit Ölbrennern zum Ende der Serie durchgeführt werden. Es sollte vermieden werden, Brände von großer Intensität in benachbarten Wohnungen ablaufen zu lassen, um die Standsicherheit der Wohnungstrennwände nicht durch Beflammung von zwei Seiten in Frage zu stellen. Andererseits sollten die zeitlich aufeinanderfolgenden Versuche in Wohnungen durchgeführt werden, die möglichst nahe beieinander lagen, um für das Umsetzen der Geräte die Transportwege kurz zu halten und um Meßleitungen, die in und am Gebäude fest verlegt waren, möglichst mehrmals ohne zwischenzeitliche Demontage verwenden zu können. Zudem sollten die Versuche, bei denen die Beheizung der Brandräume mit Ölbrennern

erfolgte, in den unteren Endwohnungen ablaufen, um eine Montage der Brenner von der Hausaußenseite unter Verwendung von niedrigen Arbeits- und Schutzgerüsten zu ermöglichen. Unter Berücksichtigung all der vorerwähnten Umstände wurde das in Tab. 3.1 aufgezeigte Versuchsprogramm als optimale Lösung erarbeitet.

Die reibungslose Durchführung der Versuche erforderte umfangreiche Vorarbeiten, da das Gebäude im Stadtgebiet von Lehrte und dazu noch zwischen Bahngelände (unmittelbar an der Fernstrecke Berlin/Hannover) und an einer vielbefahrenen Ortsdurchfahrtsstraße stand. Nachdem die grundsätzliche Zustimmung zu den Brandversuchen seitens der Stadtverwaltung Lehrte, der Deutschen Bundesbahn, der Polizei Lehrte und des Niedersächsischen Landesverwaltungsamtes (hier vertreten durch das Straßenbauamt Celle) erlangt wurde, konnte mit der Detailplanung des Geschehens im „Brandhaus“ und auf dem Versuchsgelände begonnen werden.

Die Polizei in Lehrte konnte dafür gewonnen werden, vor und während der Brandversuche die Ortsdurchfahrtsstraße im Bereich des Versuchsgeländes halbseitig zu sperren und den Verkehr umzulenken. Die Versuche wurden während der verkehrsschwachen Vormittags- und frühen Nachmittagsstunden durchgeführt. Die Polizei Lehrte hielt überdies auch die Schaulustigen von der unmittelbaren Umgebung des Gebäudes während der Versuche fern.

Durch gezielte Informationen der Einwohnerschaft durch die örtliche Presse konnte erreicht werden, daß die kurzzeitig während der Brandversuche aufgetretenen Beeinträchtigungen durch Qualm, Ruß und Verkehrsbeschränkung ohne Zwischenfall hingenommen worden sind.

Vor Beginn der Versuchsserie konnten auch Bedenken seitens der Gewerbeaufsicht hinsichtlich des Arbeitsschutzes durch Vorlage eines umfassenden Sicherheitsprogrammes zerstreut werden. Die wesentlichen Punkte waren dabei folgende:

Bei jedem Versuch war ein Löschzug samt Mannschaft der Freiwilligen Feuerwehr Lehrte zugegen. Außerdem stellte die Feuerwehr Lehrte zu jedem Versuch eine mechanische Drehleiter samt Bedienungspersonal zur Verfügung, mit der jeder Punkt der Nordseite und der Giebelseiten des Hauses zu erreichen war, um in Not geratenes Meß- und Beobachtungspersonal zu retten. Entsprechend der Fassadengestaltung und den örtlichen Gegebenheiten hätte an der Südseite des Hauses eine eventuell notwendige Rettung mit Anlehnleitern erfolgen können.

Außerdem wurden einige Fluchtöffnungen in die Trennwände zwischen den beiden Haushälften gestemmt, um im Falle der Blockierung eines der beiden Treppenhäuser durch Hitze oder Rauch Zugänge zum anderen Treppenhaus zu schaffen. Um bei Notfällen verqualmte oder rauchgefüllte Räume und Flure passieren zu können, wurden Atemschutzgeräte bereitgestellt.

Da während der Versuche zwischen Versuchsleitung und Meß- und Beobachtungspersonal meistens weder Sicht- noch Hörkontakt bestand, wurde die Kommunikation mittels Funksprechanlage (walky-talky) durchgeführt. Sämtliche Gespräche wurden fortwährend von der Einsatzleitung der Feuerwehr mitgehört, so daß bei drohender Gefahr keine Informationslücke bestanden hätte.

Um ein Übergreifen des Feuers auf den hölzernen Dachstuhl zu vermeiden, wurden die Dachtraufe der Nord- und Südseite des Gebäudes mit Asbestsilikatplatten der Firma Promat, Düsseldorf (siehe Bild 8–14) bekleidet.

Eines der Ziele der Versuche mit Ölbeheizung der Brandräume war, die zusätzlichen Tragreserven von Stahlbeton-

decken in baupraktischem Einbauzustand gegenüber dem Tragvermögen eines idealgelenkig gelagerten Plattenstreifens im Laborversuch kennenzulernen. Deshalb sollte die Beheizung der Räume unter den mit Wasserfässern belasteten Versuchsdecken so lange erfolgen, bis die Tragfähigkeit der Decken nahezu erschöpft war. Damit ein örtlicher Bruch der Stahlbetonplatte nicht den Einsturz der ganzen Decke oder infolge Zugbandwirkung gar eines Gebäudeteiles zur Folge gehabt hätte, wurden unter die belasteten Decken Pfeiler aus Gasbetonsteinen gemauert, deren Kopf 30 cm Abstand zur Decke hatte. Bei vertikalen Verformungen ≥ 30 cm konnte sich dann die Decke auf die Pfeiler auflehnen.

Um die empfindlichen elektronischen Meßgeräte vor Brand- und Witterungseinflüssen zu schützen, wurden diese in Lastkraftwagen mit Kastenaufbau fest eingebaut. Zu diesen „Meßgerätewagen“ führten fest installierte elektrische Verkabelungen. Die Meß- und Gerätewagen waren an einer Erdleitung angeschlossen, um eine gegenseitige Störung durch Meßimpulse, die sich auf das elektrische Netz hätten übertragen können, auszuschließen.

4. Brandlasten und Brandbelastung des Gebäudes, Zündung und Ablauf der Brände, Ventilationsbedingungen und meteorologische Randbedingungen

Als Brandlast wurden Holzkrippen, Mobiliar und Heizöl verwendet. Bei 8 Versuchen, die mit Holzkrippen als Brandlast durchgeführt wurden, betrug die Brandbelastung je nach Ziel des Versuchs und Art des Raumes innerhalb der „Brandabschnitte“ 15, 30, 60 und 90 kg Holz/m².

Diese Holzkrippen bestanden aus Fichtenholzlaten (4 cm × 4 cm) von 0,8 m Länge. Die Krippen hatten quadratischen Grundriß, die Laten wurden in wechselweisen Lagen aufeinander genagelt, der gegenseitige Abstand der Lasten betrug doppelten Lattendurchmesser. Das Gewicht einer Krippe betrug 30 kg und die Höhe damit ca. 0,7 m. In allen Versuchen waren die Holzkrippen gleichmäßig über den Raum verteilt. Der Heizwert des Holzes wurde mehrere Male bestimmt und schwankte geringfügig zwischen 4 250 kcal/kg und 4 400 kcal/kg. Die Holzfeuchte betrug 13 % \pm 1 %.

Bei den Versuchen mit Mobiliar als Brandlast wurde eine Einheit mit Büromöbeln und -einrichtungsgegenständen ausgestattet (siehe Bild 4–1) und eine Wohnung komplett möbliert (siehe Bild 4–2), wie es sich von den Gegebenheiten des Bauwerks her anbot. Die Brandbelastungen in den einzelnen Räumen lagen zwischen ca. 20 und 50 kg/m² Holzgleichwert. Die in Bild 4–1 und Bild 4–2 bei den Einrichtungsgegenständen angegebenen Zahlen stellen den Beitrag des einzelnen Gegenstandes zur Brandbelastung in kg dar.

Bei den Versuchen 9 – 11 mit Heizöl als Brandlast wurde im oberen Drittel der Brandräume die Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102 als Temperatur-Zeit-Verlauf des Brandes gewählt.

Von der Firma Körting, Hannover, wurden leihweise 8 Ölbrenner (Preßluft-Prallzerstäuber) mit Zubehör sowie ein Ölpumpen-Zwillingsaggregat zur Verfügung gestellt. Die übrigen Brenner mit Zubehör, der Öltank (10 000 l) und ein Kompressor konnten aus eigenem Bestand verwendet werden.

Vers. Nr.	Datum	Wohnung	Raum	Brandlasten in kg/m²	Untersuchungen zur Brandentwicklung und zum Brandablauf				Temperaturmessungen und Bauteiluntersuchungen außerhalb des Gebäudes	Druck-, Temperatur- und Bauteiluntersuchungen im Gebäude
					Anzahl der Thermo-elemente	Gasanalyse	Anzahl der Druckmeßstellen	Kalori-meter		
01	26. 08. 74	1	5	30	10	—	—	ja	Kleines Meßgerüst, Vergleichskörper BAM, Kunststoffassade	
02	28. 08. 74	1	4	30	10	O ₂ , CO, CO ₂	—	—	Kleines Meßgerüst, Vergleichskörper BAM, Kunststoffassade	Lastanstieg auf „nichttragender Wand“ (Raum 3–4) Vertikalverformung Decke (Raum 4), Rißbeobachtung, Untersuchung Fassade
1	04. 09. 74	2	1	30	22	O ₂ , CO, CO ₂ — — — —	— — — — —	ja	Stahlbetonstütze vor Raum 1 Meßurm vor Raum 1 Vergleichskörper BAM vor Raum 1	Lastanstieg (Raum 1–2) Vertikalverformung (Raum 1) Stahldehnung Auflager (Raum 1–3) Stahldehnung Decke (Raum 2) Rißbeobachtung
2	09. 09. 74	9	1 2 3 4 5 6	Mobiliar s. Bild 4–1	26 16 6 4 3 5	O ₂ , CO — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	I 140 vor Raum 1 Rechteckrohr vor Raum 2 Meßurm vor Raum 1	Luftdruckmessung (Raum 1) Brandverhalten Unterdecke (GKF-Platten) Horizontalverschiebung der Decke
3	13. 09. 74	11	1 2 3 4 5 6	Mobiliar s. Bild 4–2	26 16 8 5 3 5	CO, CO ₂ O ₂ , CO, CO ₂ CO — — —	— — — — — —	ja — — — — —	I 140 vor Raum 1 Rechteckrohr vor Raum 2 (beschichtet) Meßurm vor Raum 2 Vergleichskörper BAM in Raum 1	Lastanstieg (Wohnung 11 + 12) Luftdruckmessung (Raum 1) Rißbeobachtung Horizontalverschiebung
4	18. 09. 74	2	1 2 3 4 5	30 30 30 30 30	25 16 8 6 3	CO ₂ O ₂ , CO, CO ₂ — — —	11 — 1 — —	ja — — — —	Meßurm vor Raum 1 Stahlbetonstütze vor Raum 1 I 140 vor Raum 2 Vergleichskörper BAM in Raum 2 in Raum 4 in Raum 5 vor Raum 1	Lastanstieg (Wohnung 2 + 1) Stahldehnung Auflager (Raum 1–3 und 2–3) Stahldehnung Decke (Raum 1, Wohnung 1) Vertikalverformung (Raum 1, 2, 4) Luftdruckmessung (Raum 2) Rißbeobachtung
5	23. 09. 74	5	1 2 3 4 5 6	30 60 15 15 15 30	26 16 6 5 3 5	CO, CO ₂ O ₂ , CO CO — — —	18 — — — — —	— — — — — —	Meßurm vor Raum 1 Betonstütze vor Raum 2 IPB 240 vor Raum 1 Rechteckrohr vor Raum 2 Vergleichskörper BAM in Raum 1 in Raum 6 vor Raum 2 in Raum 2 vor Raum 2	Stahldehnung Auflager (Raum 1–3 und 2–3) Vertikalverformung (Raum 1, 2, 5, 6) Luftdruckmessung (Raum 1) Rißbeobachtung Horizontalverschiebung Tür 1
6	27. 09. 74	3	1 2 3 4 5 6	60 60 15 15 15 30	15 14 6 5 2 4	CO, CO ₂ CO — — — —	3 8 — — — —	— — — — — —	Meßurm vor Raum 2 Betonstütze vor Raum 2 IPB 240 vor Raum 1	Lastanstieg (Wohnung 3 + 4) Luftdruckmessung (Wohnung 3, Raum 1) Rißbeobachtung Horizontalverschiebung
		7	1 2 3	30 30 15	12 14	— O ₂ , CO, CO ₂	4 4	— — —	Vergleichskörper BAM Raum 1 Raum 2 Raum 3	
7	08. 10. 74	10	1 2	60 60	20 23 Zwischendecke 4	— —	4 8 4 4	— —	Meßurm vor Raum 1 IPB 240 vor Raum 1	Brandverhalten Unterdecke (Mineralfaserplatten)
8	03. 10. 74	8	1 2 3 4 5	90 90 15 15 15	15 13 6 10 3	CO, CO ₂ CO, CO ₂ — — —	— 8 3 4 —	— — — — —	Meßurm vor Raum 2 IPB 240 vor Raum 2 Rechteckrohr vor Raum 2 IPB 140 Giebelfenster	Lastanstieg (Wohnung 7 + 8) Luftdruckmessung (Raum 2, Wohnung 8) Vertikalverformung (Raum 1 + 4, Wohnung 8) Horizontalverschiebung (Wohnung 8) Rißbeobachtung Stahldehnung Decke (Raum 1, Wohnung 7) Tür 2 (Wohnung 8) Tür 3 (Wohnung 12)
		12	1 2	30 30	11 13	— O ₂ , CO	4 4	— —	Vergleichskörper BAM Vergleichskörper BAM in Raum 1 in Raum 3 vor der in Raum 2 Balkontür Raum 1	
9	16. 10. 74	1	2 4 6 1/2, 3	Heizöl, Einheits-temperaturkurve in Raummitte 100 min	24	—	—	—	—	Vertikalverformung (Raum 2, 5, 6) Horizontalverschiebung Stahldehnung Auflager (Raum 2–3) Rißbeobachtung Tür 4
10	22. 10. 74	4	1 4 1/2, 3	Heizöl, Einheits-temperaturkurve in Raummitte 120 min	24	—	—	—	—	Vertikalverformung (Raum 1, 4) Stahldehnung Auflager (Raum 1–3) Stahldehnung Decke (Raum 2, Wohnung 4) Horizontalverschiebung Messung der Temperaturen auf der Decken-oberfläche Rißbeobachtung
11	28. 10. 74	6	1 4 1/2, 3	Heizöl, Einheits-temperaturkurve in Raummitte nach 75 min, abgebrochen wegen defekter Ölpumpe	24	—	—	—	—	siehe Versuch 10 Lastanstieg (Raum 1 + 2)

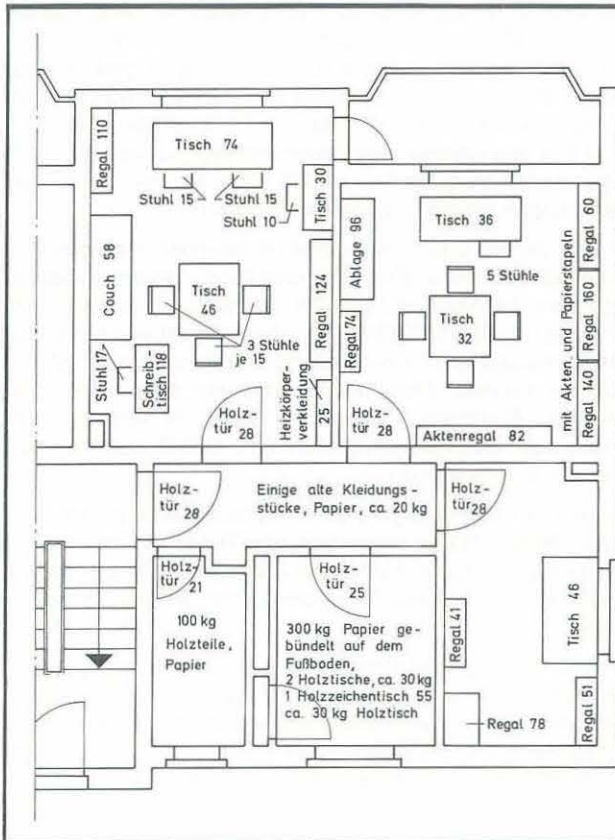


Bild 4-1: Wohnungsmobiliar als Brandlast

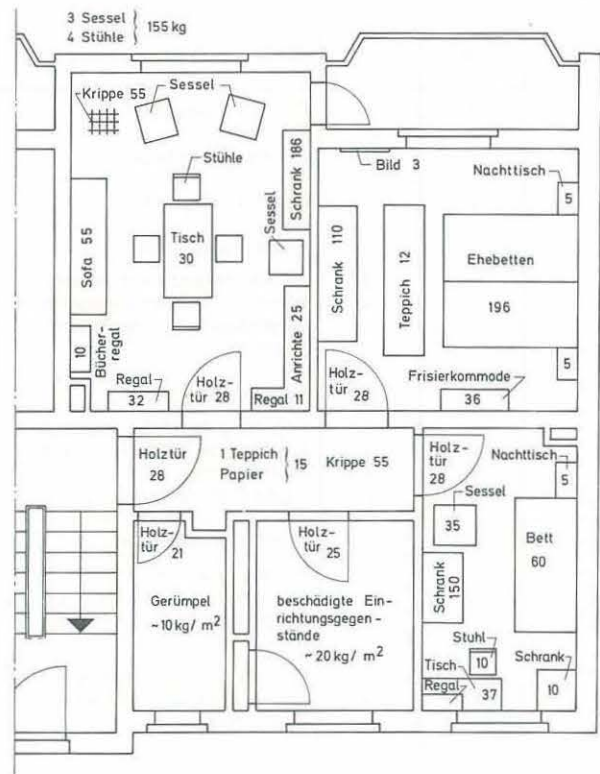


Bild 4-2: Büroeinrichtung als Brandlast

Brandbelastungen in kg Holz/m²

	Wohnmobiliar	Büromobiliar
Raum 1 Wohnzimmer	32	39
Raum 2 Schlafzimmer	26	52
Raum 3 Flur	18	9
Raum 4 Küche	20	50
Raum 5 Bad	10	33
Raum 6 Kinderzimmer	36	26

Die Zündung der Brände erfolgte bei den Hauptversuchen immer in der Mitte des Raumes 1 mit einer Lunte, die mit einem Benzin-Öl-Gemisch (ca. 0,5 l) getränkt war. Ein natürlicher, ungestörter Brandverlauf nach der Zündung war für alle Versuche beabsichtigt.

Der Tabelle 4.1 sind die Fensterstellungen zu Versuchsbeginn (Ventilationsbedingungen) zu entnehmen. Während des Versuchsablaufs notwendig gewordene Änderungen sind ebenfalls in Tabelle 4.1 enthalten.

Die Größe der jeweiligen Ventilationsöffnungen ist dem Kapitel 2 (Beschreibung des Versuchshauses) zu entnehmen.

Tabelle 4.1

Versuch Nr.	Wohnung	Raum	Art der Ventilationsbedingung
01	1	5	Fenster ausgebaut.
02	1	4	Fenster ausgebaut.
1	2	1	Fenster ausgebaut.
2	9	1 2 4 5 6	Fenster ausgebaut. Fenster gekippt, nach 60 min Fenster mit Steinen eingeschlagen Benzinflaschen in die Räume geworfen.
3	11	1 2 4 5 6	Fenster ausgebaut. Fenster gekippt. Scheiben zer- springen bei Entflammung des Brandraumes. Keine Fremdeinwirkung.
4	2	1 2 4 5	Fenster geschlossen. Fenster geschlossen. Nach 75 min Fenster mit Stein eingeschlagen, Benzinflasche in den Raum geworfen. Fenster gekippt. Scheibe zer- springt bei Entflammung des Brandraumes.
5	5	1 2 4 5 6	Alle Fenster geöffnet. Fenster gekippt, nach 30 min eingeschlagen.
6	3	1 2 4 5 6	Alle Fenster geöffnet.
	7	1 2	Nach 100 min mit Benzinflasche fremdgezündet.
7	10	1 2	Fenster ausgebaut. Raum 1 zündet erst nach 30 min, Raum 2 nach 100 min. Mit Benzin- flasche fremdgezündet.
8	8	1 2 4 5	Alle Fenster geöffnet.
	12	1 2	

Alle Türen innerhalb einer Wohnung waren bei Versuchsbeginn geöffnet, die Wohnungstüren jedoch geschlossen (s. Kap. 7.4). Dadurch war eine Querbelüftung möglich. Keine Querbelüftung war ermöglicht bei den Vorversuchen 01 und 02, beim Versuch 1, bei den Räumen 1 und 2 der Versuche 6 und 8 in den jeweilig oben liegenden Wohnungen W 7 und W 12 und bei Versuch 7 in beiden Räumen. Hier waren die Türöffnungen jeweils zugemauert worden.

Die das Versuchsgeschehen beeinflussenden meteorologischen Randbedingungen – Windrichtung, -geschwindigkeit und Lufttemperatur – wurden vor und während eines jeden Versuchs registriert. Die Windgeschwindigkeit wurde mittels Schalenkreuzanemometer und die -richtung mittels Windfahne festgestellt. Die Windrichtung wurde in Höhe des jeweiligen Brandgeschosses von einem im Abstand von ~ 10 m vom Gebäude entfernten Meß- und Beobachtungsturm aus aufgenommen.

Die auf dem Versuchsgelände in Gebäudenähe aufgenommenen Werte unterschieden sich zum Teil erheblich von den gleichzeitig in 40 m Höhe vom Wetteramt Hannover in Langenhagen ermittelten Windgeschwindigkeiten und -richtungen.

Der größte Einfluß der meteorologischen Randbedingungen war beim Brandgeschehen vor der Fassade festzustellen. Deshalb sind die Wetterdaten jedes Versuchs in den Anlagen auf derselben Seite wie die Temperaturen auf der Achse des Heißgasstromes dargestellt (s. Anlagen).

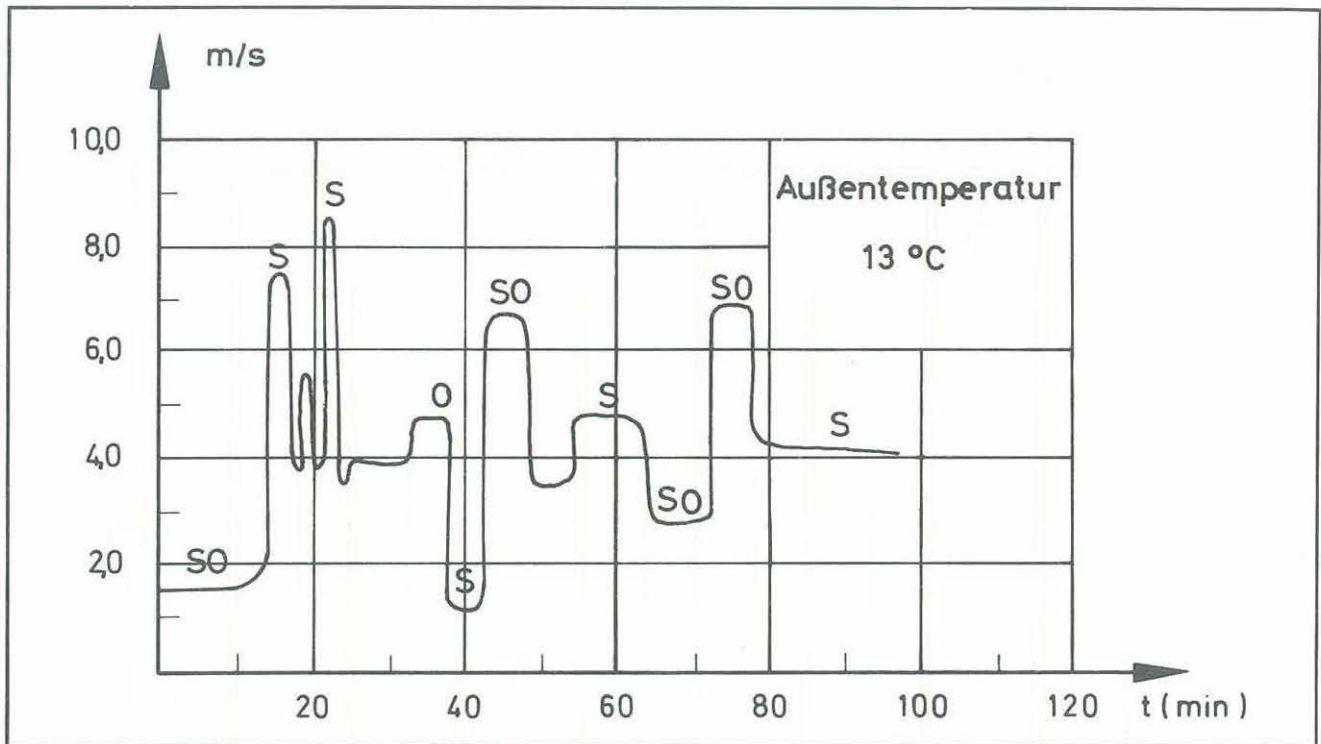


Bild 4-3: Windgeschwindigkeit und -richtung

Am Beispiel des Versuchs 5 seien sie hier näher erläutert:

Der Betrag der Windgeschwindigkeit ist als Ganglinie über der Zeit aufgetragen. Der Zeitmaßstab wurde dabei so gewählt, daß er mit den Maßstäben der Zeittemperatur- und der Zeitverformungslinien, die in den Anlagen wiedergegeben sind, übereinstimmt. Dies erleichtert das Erkennen der Windeinflüsse auf die Meßwerte. Die Windrichtung ist durch Kurzzeichen mit angegeben. Es bedeutet zum Beispiel SO: der Wind weht aus südöstlicher Richtung.

Die Außentemperatur zu Versuchsbeginn ist in den Diagrammen über die Windangaben in der rechten oberen Ecke angegeben.

5. Gewählte Meßverfahren und eingesetzte Meßgeräte

Temperaturmessung

Die Temperaturmessung in den Versuchsräumen und vor der Fassade erfolgte mit 3 mm dicken NiCr-Ni-Mantelthermoelementen unterschiedlicher Länge. Die Zuleitungen vom Anschlußkopf zu den Meßwagen bestanden aus asbestummantelten NiCr-Ni-Ausgleichsleitungen. Die auftretenden Thermospannungen wurden für die Messungen im Brandraum durch Kompensationspunktschreiber und Linienschreiber aufgezeichnet. Die Originalmeßwerte der Brandraumtemperatur wurden auf Lochkarten übertragen. Ein elektronischer Rechner berechnete die Temperaturmittelwerte, -maxima und -minima, und stellte die Zeichnungen

her. Dadurch wird bei der Darstellung der Meßergebnisse der optische Eindruck von Unstetigkeitsstellen im Kurvenverlauf erweckt. Der Rechner hat jedoch einzelne Meßpunkte linear miteinander verbunden. Dieser Sachverhalt gilt für die Darstellung aller Meßergebnisse.

Die Thermoelemente wurden von den jeweiligen Nachbarräumen durch Wandbohrungen in die Brandräume geführt und gegebenenfalls durch Drähte befestigt, so daß während des Versuchs der Meßplatz unverändert blieb.

Gasanalyse

Zur Messung der Gaszusammensetzung standen für jeden Versuch insgesamt sieben Gasanalysatoren zur Verfügung, drei Geräte zur Bestimmung des Kohlendioxidgehalts, drei zur Bestimmung des Kohlenmonoxids, und ein Gerät bestimmte den Luftsauerstoff. Die Messung geschah derart, daß ein Gebläse über ein Stahlrohr aus dem Brandraum die Verbrennungsgase ansaugte und diese den Analysatoren zuführte. Es wurden jeweils drei Rohre verlegt, so daß in drei Räumen der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt bestimmt werden konnte. In einem Raum wurde zusätzlich der Luftsauerstoff gemessen. Die Gasentnahmestelle befand sich jeweils in Raummitte 1,5 m (Kopfhöhe) über dem Fußboden. Die Analysenergebnisse wurden in elektrische Signale umgewandelt und auf einem 6-Kanal- und einem 1-Kanal-Linienschreiber automatisch aufgezeichnet. Die Meßbereiche für die einzelnen Komponenten waren:

Sauerstoff	0 – 21 %,
Kohlendioxid	0 – 25 %,
Kohlenmonoxid	0 – 10 %.

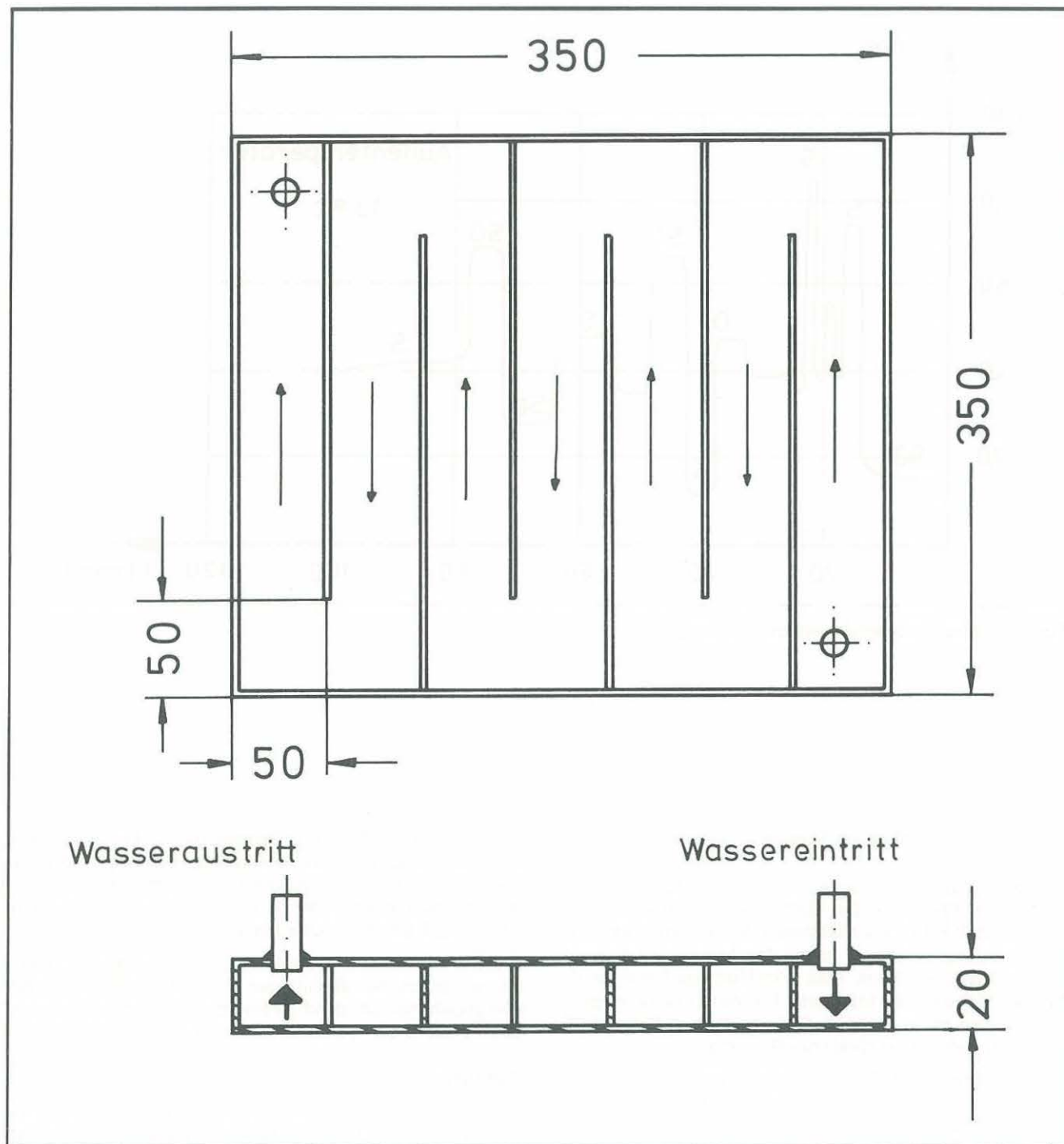


Bild 5-1: Aufbau des Kalorimeters

Wärmestromdichten

Die Wärmestromdichten wurden mit Hilfe einer 350 mm × 350 mm wasserdurchflossenen Blechplatte bestimmt (siehe Prinzipskizze).

Die Platte hatte eine Höhe von 20 mm und eine Wandstärke von 2 mm. Das Kalorimeter wurde in die Decke des

Brandraums eingebaut und ist jeweils dem Thermoelement 1 zugeordnet. Alle Seiten des Kalorimeters, mit Ausnahme der dem Brand ausgesetzten Fläche, wurden durch Wärmedämmmaterial weitgehend adiabatisch isoliert. Die durchfließende Wassermenge wurde mit Hilfe eines Rotameters bestimmt. Die Wasserein- und -austrittstemperaturen wurden mit Eisen-Konstantan-Thermoelementen gemessen und mit einem Kompensationsschreiber registriert.

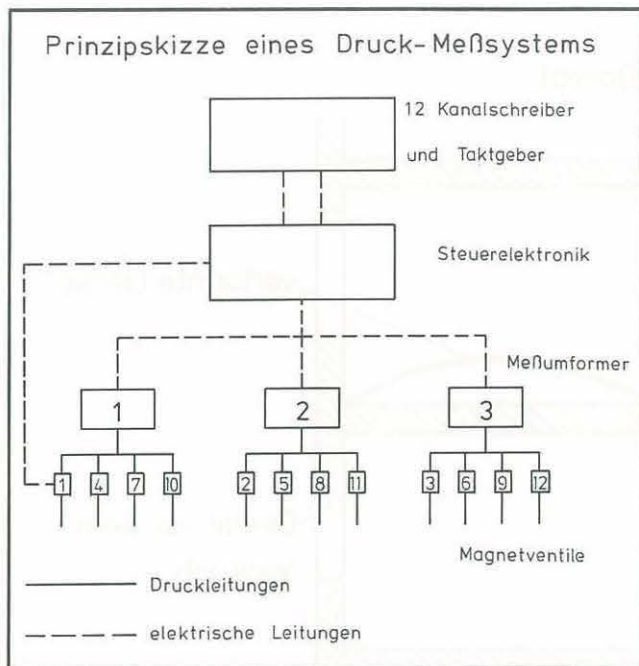


Bild 5-2: Prinzipskizze des Druck-Meßsystems

Druckmessung

Zur Druckmessung wurde das in der Prinzipskizze gezeigte Meßsystem verwendet.

Das Meßsystem bestand aus einem 12-Kanal-Punktschreiber, einer Steuerelektronik, drei Druck-Meßumformern, zwölf Magnetventilen und zwölf dazugehörigen Druckrohren.

Zu Beginn der Messung öffnete die Steuerelektronik die Magnetventile 1, 2 und 3, so daß der Druck an den Meßumformern anlag. Alle anderen Magnetventile blieben geschlossen. Die Elektronik fragte den am Meßumformer 1 in ein elektrisches Signal umgewandelten Druck ab und meldete es dem Schreiber. Den Drucker-Impuls des Schreibers verwendete die Elektronik zum Schließen des Ventils 1, zum Öffnen des Ventils 4 und zum Umschalten auf den Meßumformer 2. Es folgte das Abfragen der Meßstelle 2 über den Meßumformer 2, Schließen des Ventils 2, Öffnen des Ventils 5 und Umschalten auf Meßstelle 3, deren Druck am Meßumformer 3 anlag. Entsprechend wurden nach laufenden Nummern alle zwölf Magnetventile angesteuert und die Meßwerte abgefragt. Der Schreiber hatte eine Punktfolge von zwei Sekunden, so daß jedes Magnetventil sechs Sekunden bis zur Abfrage geöffnet war. Vorversuche hatten ergeben, daß diese Zeit zum Druckaufbau ausreichte. Jede Meßstelle hatte damit eine Meßfolge von 24 Sekunden. Für die Versuche wurden zwei solcher Meßsysteme verwendet. Ein System bestand jedoch nur aus zwei Meßumformern, so daß die Meßstellen 3, 6, 9, 12 zu Null gemessen wurden. Insgesamt konnten damit pro Versuch 20 Druckmeßstellen installiert werden. Wegen meßtechnischer Schwierigkeiten konnte mit der Druckmessung erst zu Versuch 4 begonnen werden. Die Druckleitungen bestanden aus 10 mm dicken Stahlrohren, die durch Bohrungen aus den Nebenräumen in den Brandraum geführt wurden.

Um die Meßleitungen so kurz wie möglich zu halten, standen die Meßumformer in den benachbarten Räumen, gegebenenfalls im darüberliegenden Raum.

Das Meßwerk eines Meßumformers bestand aus einer Tauchglocke, so daß der Differenzdruck zwischen zwei Räumen gemessen wurde.

Jede Druckmeßstelle war einer Temperaturmeßstelle zugeordnet, dadurch sind die Kennzeichnungen identisch.

Zusätzliche Druckmessung im Brandraum mittels Schrägrohrmanometer

Neben den vom Institut für Wärmetechnik und Industrieofenbau der Technischen Universität Clausthal durchgeführten Druckmessungen wurden im Brandraum bzw. im Raum zwischen der nachträglich eingezogenen Unterdecke und der Stahlbetondecke in Anlehnung an Normversuche Druckmessungen mit Schrägrohrmanometern durchgeführt. Mit diesen Geräten wurde die Druckdifferenz zwischen dem Brandraum bzw. Deckenzwischenraum und dem benachbarten, nicht beheizten Raum gemessen (s. Bild 5-3).

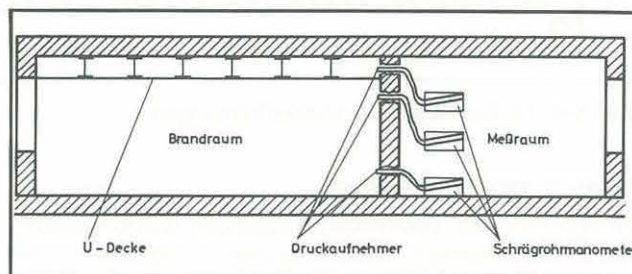


Bild 5-3: Druckmessung mit Schrägrohrmanometern

Die Ergebnisse der Druckmessungen mittels Schrägrohrmanometer sind vor allem im Zusammenhang mit dem Einströmen von Heißgasen in den Raum zwischen beflammter Unterdecke und Rohdecke des Gebäudes zu sehen. Die Meßergebnisse korrespondieren sehr gut mit den Ergebnissen der automatischen Druckmessung. Die Druckmessung als solche wurde deshalb nur einmal in Kap. 7.3 bzw. den Anlagen wiedergegeben.

Meßgeräte für die Untersuchungen an Innen- und Außenbauteilen

Dehnungsmessung (Stahldehnung)

Im Vorversuch 02 wurde die Einsatzmöglichkeit von Dehnungsmessstreifen – Typ Hottinger 60/120 LP 21 – erprobt. Es zeigte sich, daß die Dehnungsmessstreifen für die Messung von Betondehnungen bei Stahlbetondecken im Einbaustand nicht geeignet sind, da nicht vorhersehbare Rißbildung bei Temperaturbeanspruchung von unten die Meßergebnisse unkontrollierbar beeinflussen.

In den folgenden Versuchen wurde daher auf das im Labor erprobte Meßverfahren mit mechanischen Setzdehnungsmessern – Typ Pfänder (Meßlänge 10 cm) – zurückgegriffen, bei dem die Dehnungen am Bewehrungsstahl gemessen wurden. Die Bewehrung wurde im Bereich von Zwischenauflegern und an den Rändern der beheizten Plattenstreifen freigelegt und mit Meßmarken im Abstand von 10 cm beklebt.

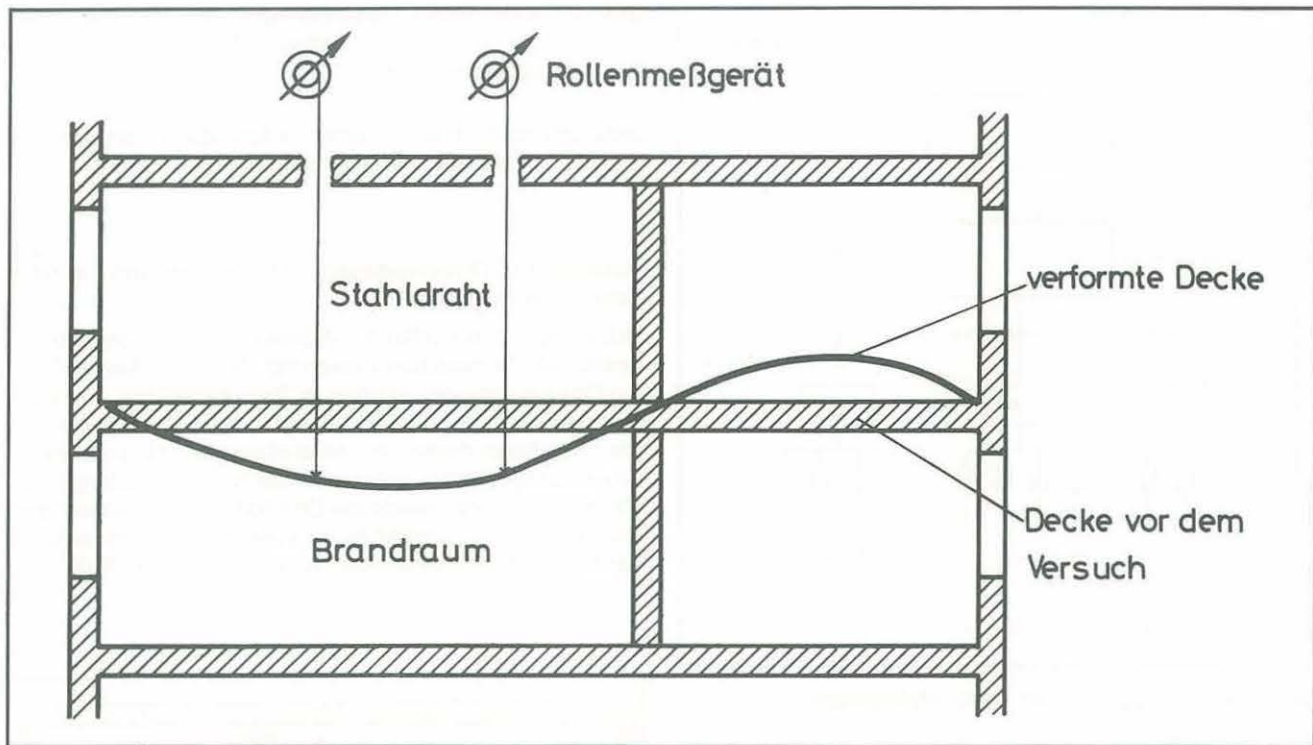


Bild 5-4: Meßverfahren Vertikalverformungen

Messung von Verformungen

Zur Messung der Deckendurchbiegungen wurden Rollenmeßgeräte verwendet, die über dünne Stahldrähte mit der geprüften Decke verbunden waren. Als unverschieblicher Festpunkt wurde die Decke im darüberliegenden Geschoß betrachtet (s. Bild 5-4).

Die so gemessenen Werte waren für die Auswertung genau genug, da die Raumtemperatur über dem Brandraum während des Versuchs nur unwesentlich anstieg und damit die Temperatur des Meßdrahtes nahezu konstant blieb. Die Verformung der Decke, auf der die Rollenmeßgeräte installiert wurden, blieben im Verhältnis zu den Deckenverformungen über dem Brandraum sehr gering.

Die Messung von Verformungen außerhalb des Gebäudes war auf mechanischem Wege nicht möglich. Deshalb wurden an der Außenseite des Geländes in Höhe der brandbeanspruchten Decke und an den Außenstützen Meßmarken angebracht, deren Bewegungen optisch verfolgt werden konnten. Als Meßmarken wurden Stahlnägel verwendet, die in den entsprechenden Bauteilen eingedübelt waren. Als Theodoliten kamen „Wild T 2“ des Instituts für Vermes-

sungskunde der Technischen Universität Braunschweig zum Einsatz.

Messung von Auflagerdrücken unter beheizten Stahlbetondecken

Die durch Umlagerung entstandenen Zusatzlasten wurden mit Hilfe von jeweils zwei mechanischen Kraftmeßdosen gemessen, die in nachträglich gestemmte Wandschlitzte unmittelbar unter der Decke zwischen zwei Stahlträgern eingebaut wurden (s. Bild 7-22). Dieses Meßverfahren gibt näherungsweise darüber Auskunft, wie groß der Lastanstieg auf den als nichttragend angenommenen Wänden ist.

Der Meß- und Beobachtungsturm vor dem Gebäude

Der Meß- und Beobachtungsturm war insgesamt 10,50 m hoch und auf einer fahrbaren Plattform vor der Südseite des Hauses aufgestellt. Er hatte drei Beobachtungsebenen, von denen aus das Versuchsgeschehen auf der Südseite des Hauses überwacht werden konnte. Im Bereich dieser Ebenen war der Turm hausseitig mit Promabestplatten bekleidet, um die auf den Bühnen stehenden Meß- und Beobachtungstrupps vor Strahlungseinflüssen zu schützen. Der

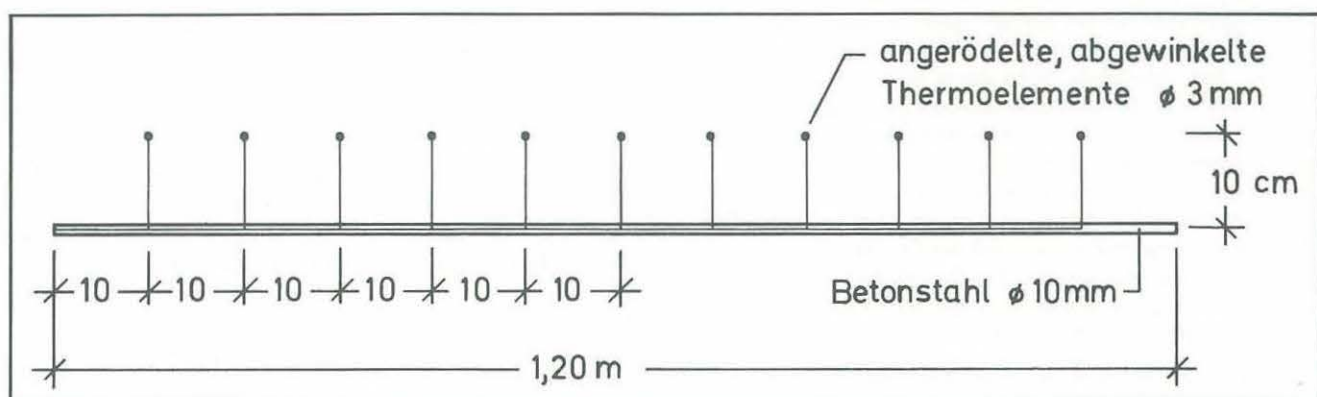


Bild 5-5: Meßstab mit angerödelten Thermoelementen zur präzisen Erfassung des Temperaturfeldes

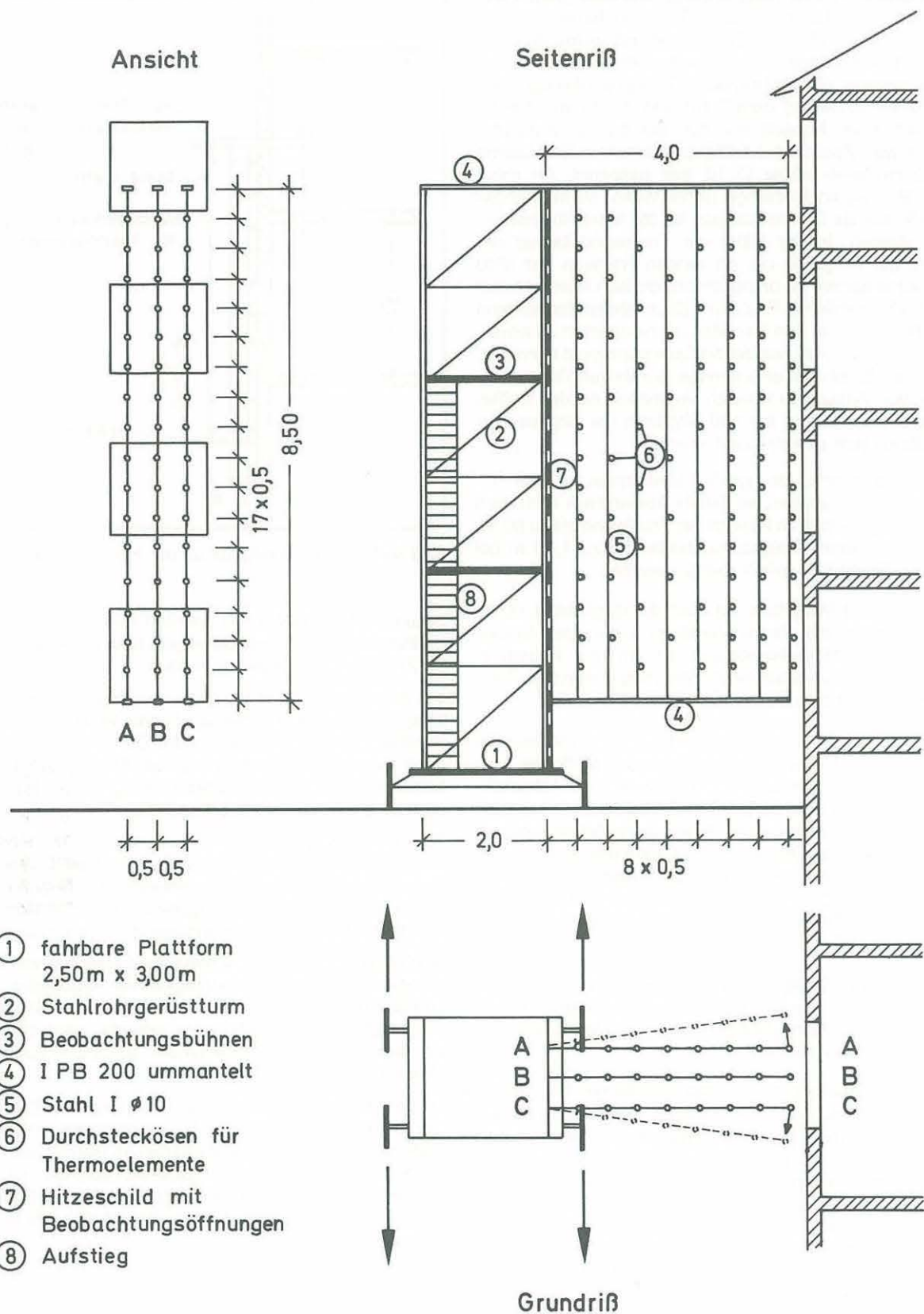


Bild 5-6: Meß- und Beobachtungsturm

Turm stand 4 m vom Haus entfernt, um eine „Kaminwirkung“ der Bekleidung auf das Brandgeschehen vor der Fassade auszuschließen. Eine Meßebeine wurde durch je oben und unten liegende mit Promasbestplatten ummantelte Stahlprofile IPB 200 gebildet. Die Stahlprofile lagen mit ihrem einen Ende auf dem Turm und mit ihrem anderen Ende auf einer Konsolleiste auf, die an der Hausfront befestigt war. Zwischen die Stahlprofile waren im Abstand von 50 cm Betonstähle \varnothing 10 mm gespannt. An diese Betonstähle waren Stahlringe (lichte Weite: 50 mm) angeschweißt, die als Durchsteckkösen für die Mantelthermoelemente dienten. In der Nähe der Frontwand betrug der Abstand der Ringe 50 cm, im übrigen Freiraum 1 m (Bild 5–6). Somit konnte im brandschutztechnisch interessanten Bereich ein räumliches Raster mit 50 cm Meßstellenabstand gesteckt werden, in den Gebieten mit niedrigeren zu erwartenden Temperaturen war der Meßstellenabstand dann 1 m. So konnte, obwohl nur eine geringe Anzahl von Thermoelementen von Versuch zu Versuch umgesteckt werden mußte, eine optimale Nutzung der 100 Eingänge der eingesetzten Vielstellenanlage gewährleistet werden.

Die drei Meßebenen des großen Meßturmes konnten einzeln geschwenkt werden, so daß ihr Abstand am Turm noch 50 cm betrug, jedoch im Bereich der Frontwand bis zu 80 cm war, so daß eine Heißgasstrombreite bis zu 1,60 m bei einzelnen Versuchen erfaßt werden konnten.

Der Aufbau des Meßgitters bot auch die Möglichkeit, durch Einsetzen eines mit Thermoelementen bestückten Stabes mit geringem Meßstellenabstand (25 cm und 10 cm) in wesentlichen Meßquerschnitten den Temperaturverlauf auf einer Schnittlinie detailliert zu verfolgen (Bild 5–5).

An der Nordseite des Gebäudes wurde bei den Versuchen 01 und 02 ein kleines zweidimensionales Meßgitter zum Einsatz gebracht. Dieses bestand aus einem mit Asbestsilikatplatten (Firma Promat, Düsseldorf) bekleideten Holzbalken, der als Kragarm ausgebildet als obere Befestigung von drei Hängestangen (Betonstahl \varnothing 10 mm) diente und einem IPB 100 als untere Befestigung der Hängestangen. Wie beim großen Meßraum waren an die Betonstähle Durchsteckkösen für Thermoelemente im Abstand von 50 cm angeschweißt (Bild 5–7).

Da das kleine Meßgerüst nur im Bereich der kleinen Fensteröffnungen der Nordseite eingesetzt wurde, betrug der Abstand der Hängestangen untereinander 30 cm, der Abstand von der Hauswand 10 cm.

Als Zusatzausrüstung zu den fest installierten Thermoelementen der Meßgerüste kamen noch „Wanderthermoelemente“. Dies sind Thermoelemente, die mit einer langen und beweglichen Ausgleichsleitung an einem Stab befestigt sind. Mit diesen Thermoelementen konnten an Stellen außerhalb der Meßgitter Temperaturen gemessen werden. Die Wanderthermoelemente waren stets dann von Bedeutung, wenn die Heißgase durch Querwind in den über der Brandraumöffnung liegenden Zonen aus dem Bereich des Meßturmes abgetrieben wurden.

Die Meßimpulse vom Meßturm und von den Wanderthermoelementen wurden an eine Datenerfassungsanlage (Doric-Digitrend 210) weitergegeben. Die 100 Meßstellen wurden während des Brandversuchs im allgemeinen jede Minute einmal abgefragt. Die Abfragezeit für 100 Meßstellen betrug 20 Sekunden.

Die Meßdaten wurden sowohl digital angezeigt und sofort ausgedruckt als auch für die spätere Auswertung auf Lochstreifen gestanzt. Über eine elektronische Datenverar-

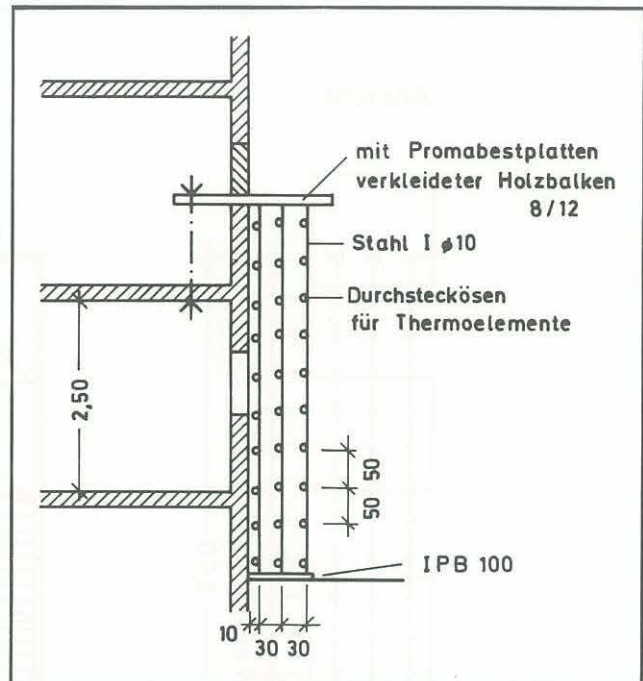


Bild 5–7: Kleines Meßgitter an der Hausnordseite

beitungsanlage IBM 1130 konnten nun die Meßdaten als Isothermen für einzelne Zeitpunkte oder aber als Temperatur-Zeit-Linien ausgegeben werden.

Um Aussagen über den Wärmeübergang auf Außenstützen infolge Konvektion machen zu können, wurden die Heißgasgeschwindigkeiten gemessen. Im Bereich der Fensteröffnung wurde ein wassergekühltes Flügelradanemometer installiert, das die Austrittsgeschwindigkeit der Rauchgase aus der Brandraumöffnung feststellte.

Sowohl vor der Brandraumöffnung als auch im aufsteigenden Heißgasstrom wurde der Verlauf der Heißgasgeschwindigkeit optisch bestimmt. Rechtwinklig zur Strömungsrichtung wurde der Weg der Heißgase von einer Filmkamera mit konstanter Bildfolge-Geschwindigkeit aufgenommen.

Nach Cox [29] ist dies die genaueste Methode zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit von Rauchgasströmungen bei Holzfeuern. Die Zeit, die ein Rauchgasteilchen zum Durchlaufen einer Meßstrecke braucht, wird durch den Vergleich kurzzeitig nacheinander aufgenommener Bilder ermittelt.

In den Stahlbetonaußenstützen wurden die Thermoelemente (Eisen-Konstantan) in verschiedenen Horizonten eingebaut. Die Meßhorizonte hatten im Bereich der Brandraumöffnung und im Übergangsbereich zum nächsthöheren Geschoß einen Abstand von 50 cm. In größerer Entfernung zum Brandraumfenster hatten die Meßhorizonte einen Abstand von 100 cm.

Die Meßpunkte im Querschnitt waren in 1, 2, 3 und 6 cm Abstand von der Oberfläche angebracht, jeweils auf der Symmetrieachse des Querschnitts (Bild 8–27) und zum Teil auch auf der Diagonalen. Somit wurde es möglich, aus den im Querschnitt gemessenen Temperaturen rechnerisch bzw. halbgraphisch die Oberflächentemperaturen zu ermitteln.

An den Stahlaußenstützen IPB 240 wurden die Mantelthermoelemente an den beiden Flanschen und am Steg ebenfalls in 50 bzw. 100 cm Abstand (gemessen längs der Stützenachse) angeschraubt. Ebenso wurde bei den I 140-Profilen vorgegangen.

6. Ergebnisse der thermischen Untersuchungen

6.1. Brandentwicklung und Brandausbreitung im Gebäude

6.1.1. Die Temperaturentwicklung

Zum Verständnis der Temperaturentwicklung in Einzelräumen, innerhalb einer Wohnung und bei der Untersuchung des Feuerübersprungs sind die nachfolgend dargestellten Meßstellenpläne unerlässlich.

Die einzelnen Bilder zeigen in räumlicher Darstellung die Anordnung der Temperatur-Meßstellen für jeden Versuch. Die genaue Beschreibung eines jeden Meßplatzes ist dem vorangestellt.

Vorversuch 01 (Bild 6-1) und Vorversuch 02 (Bild 6-2)

Es wurden insgesamt 10 Thermoelemente installiert, drei auf einer Linie 0,10 m unter Decke, drei auf halber Raumhöhe, drei auf einer Linie 0,20 m über dem Fußboden und ein Thermoelement am Fenstersturz.

Bei den Versuchen 1 bis 8 waren die Thermoelemente aufgrund der Ähnlichkeit der Räume und Wohnungen immer an den gleichen Orten angebracht, so daß eine Beschreibung der Meßstellen prinzipiell nur einmal erfolgen muß. Ausnahmen hiervon werden besonders erwähnt und sind den Meßstellenplänen zu entnehmen.

Raum 1

Die Thermoelemente 1 bis 9 befanden sich auf den Diagonalen 0,10 m unter der Decke. Die Elemente 3, 5, 6 und 9 hatten einen Eckenabstand von 0,5 m, die Elemente 2, 4, 7 und 8 halbierten die halben Diagonalen. Die Elemente 2-2, 4-2, 7-2 und 8-2 lagen auf den Diagonalen in halber Raumhöhe senkrecht unter den Elementen 2, 4, 7 und 8. Die Bodenelemente 10, 11, 12, 13 und 14 befanden sich ebenfalls auf Diagonalen 0,20 m über dem Fußboden senkrecht unter den beschriebenen Deckenelementen. Am Fenstersturz waren die Elemente 15 und 16 und auf der Fensterbank die Elemente 17 und 18 angebracht. In Höhe des Fenstersturzes bzw. der Fensterbank, jeweils 1 m in den Raum hinein, hingen die Elemente 19 und 20. Am Türsturz bzw. 0,20 m über dem Boden, jeweils 0,5 m in den Raum hinein, befanden sich die Elemente 21 und 22.

Raum 2

Wegen der Ähnlichkeit zu Raum 1 wurde die gleiche Numerierung der Thermoelemente gewählt. Weil die Grundfläche dieses Raumes kleiner war, konnte die Anzahl der Elemente von 26 auf 16 reduziert werden.

Raum 3

Die Elemente 39, 40, 41 und 42 waren in der Mitte zwischen den gegenüberliegenden Zimmertüren 0,1 m unter der Decke bzw. 0,2 m über dem Boden angebracht. Die Thermoelemente 43 und 44 maßen die Temperatur an der Wohnungstür am Türsturz bzw. 0,2 m über dem Fußboden. In der Tür zum Kinderzimmer bzw. zur Abstellkammer (Versuch 4 und 8) am Türsturz bzw. 0,2 m über dem Fußboden befanden sich die Elemente 37 und 38.

Versuch 01

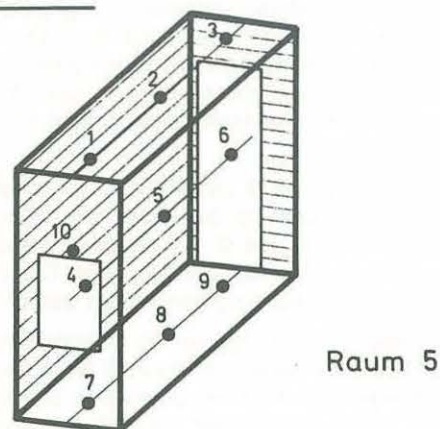


Bild 6-1: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 01

Versuch 02

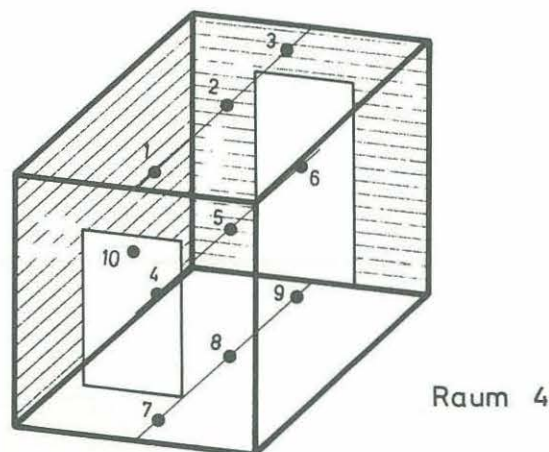


Bild 6-2: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 02

Raum 4

Auf einer Linie 0,1 m unter der Decke hingen die Elemente 45, 46 und 47, die Elemente 45 und 47 jeweils 0,5 m von der Wand entfernt. Die Elemente 48 und 49 waren 0,5 m von der Wand und 0,2 m über dem Fußboden angebracht. Bei den Versuchen 4 und 8 konnten wegen des Fehlens eines Kinderzimmers die sonst im Raum 6 verwendeten Thermoelemente 32 bis 36 in der Wohnküche installiert werden (vgl. Meßstellenplan). Element 36 befand sich am Fenstersturz.

Raum 5

Von den drei Thermoelementen maßen Element 52 in Raummitte 0,1 m unter der Decke und die Elemente 51 und 50 in Höhe Türsturz bzw. 0,2 m über dem Boden jeweils 0,5 m in den Raum.

Raum 6

Es waren jeweils fünf Elemente auf zwei Linien installiert, die obere befand sich 0,1 m unter der Decke, die untere 0,2 m über dem Fußboden. Der Wandabstand betrug 0,7 m.

Für jede Wohnung bzw. für jeden Versuch ergibt sich damit eine Gesamtzahl von 72 Thermoelementen, die durch die Zahl der vorhandenen Schreiber vorgegeben war. Sind in den Meßstellenplänen der einzelnen Versuche die hier beschriebenen Meßplätze nicht angegeben, so ist in diesem Fall das Thermoelement während des Brandes zerstört worden, so daß die Messung der Temperatur nicht erfolgen konnte.

Bei den Versuchen 6 und 8 (Feuerübersprung von Stockwerk zu Stockwerk) ist die Anzahl der Thermoelemente in den Räumen 1 und 2 so reduziert worden, daß eine Bestückung in den darüber liegenden Räumen 1 und 2 in entsprechender Form vorgenommen werden konnte.

Bei Versuch 7 wurden in die Brandräume abgehängte Unterdecken eingebaut. In Raum 1 waren zwischen Unter- und Rohdecke acht Thermoelemente und in Raum 2 vier Thermoelemente installiert, die senkrecht über den zugehörigen Elementen des beflamten Raumes lagen. Diese Meßplätze sind durch Dreiecke gekennzeichnet.

Während der Versuche wurden aus den insgesamt 512 installierten Thermoelementen 483 Zeit-Temperatur-Kurven aufgenommen; das entspricht einer Ausfallquote von nur 5,7 %.

Die folgenden Bilder 6-3 bis 6-10 zeigen in räumlicher Darstellung die soeben erläuterten Meßplätze:

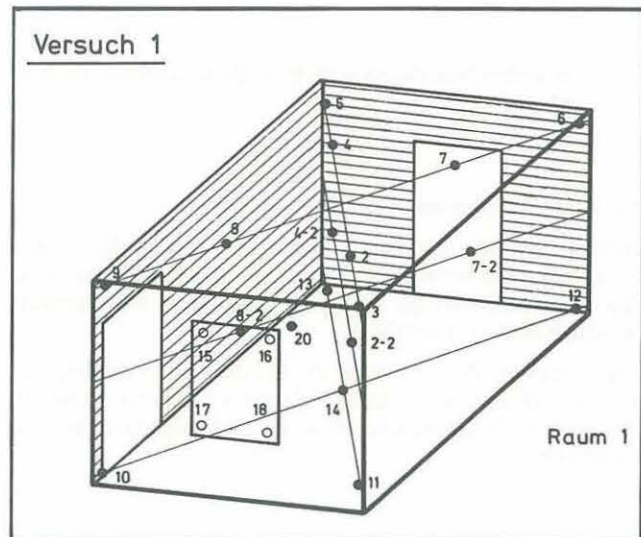


Bild 6-3: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 1

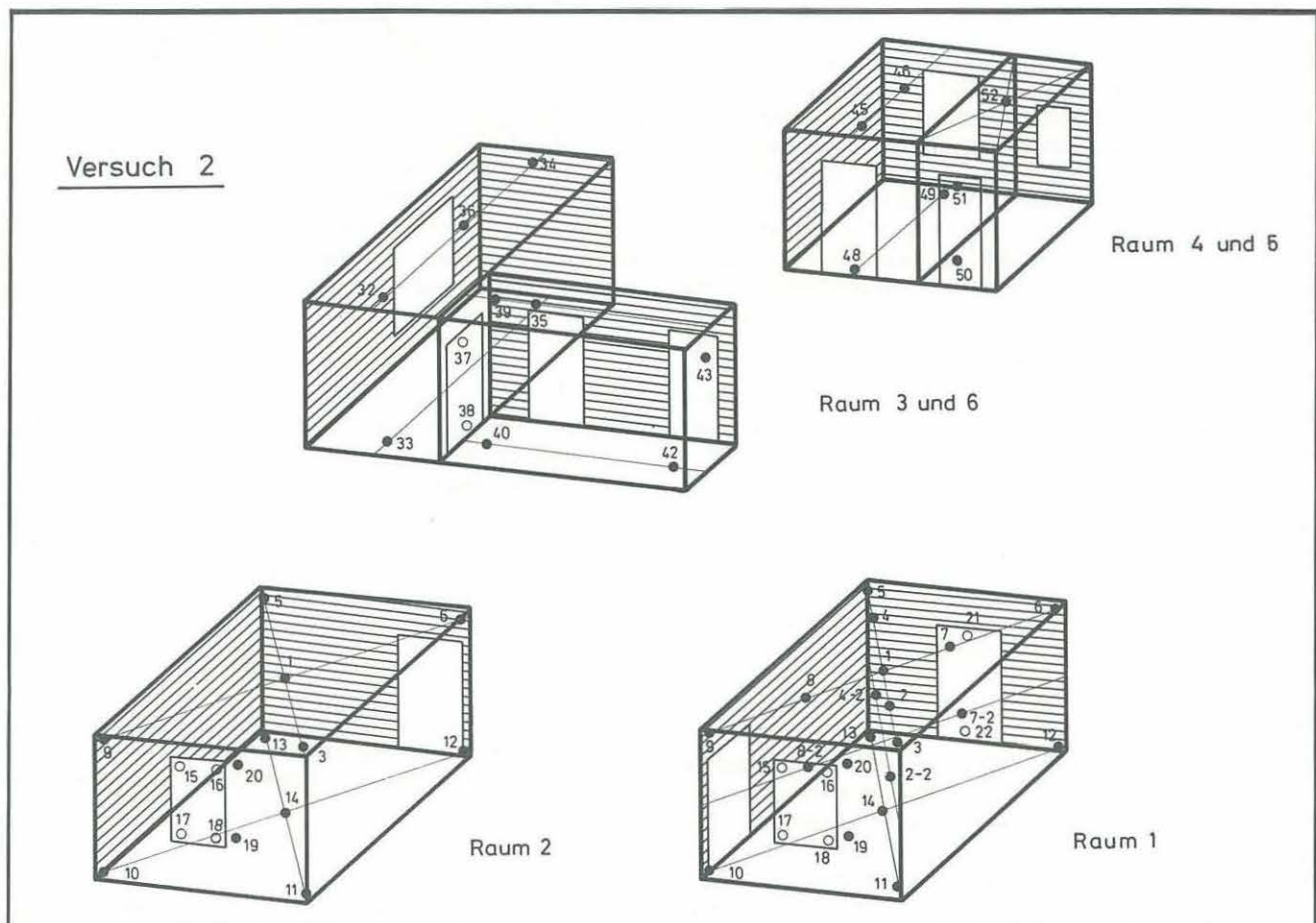


Bild 6-4: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 2

Versuch 3

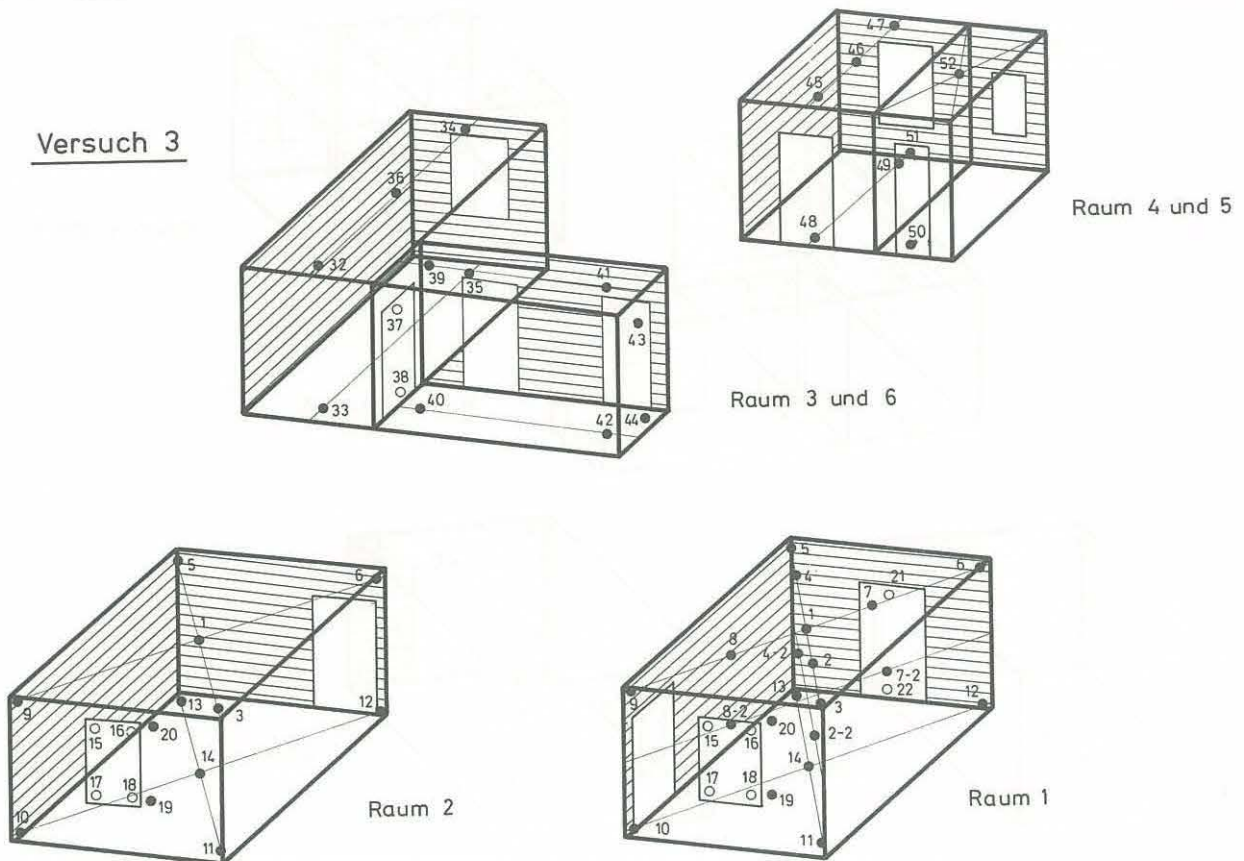


Bild 6-5: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 3

Versuch 4

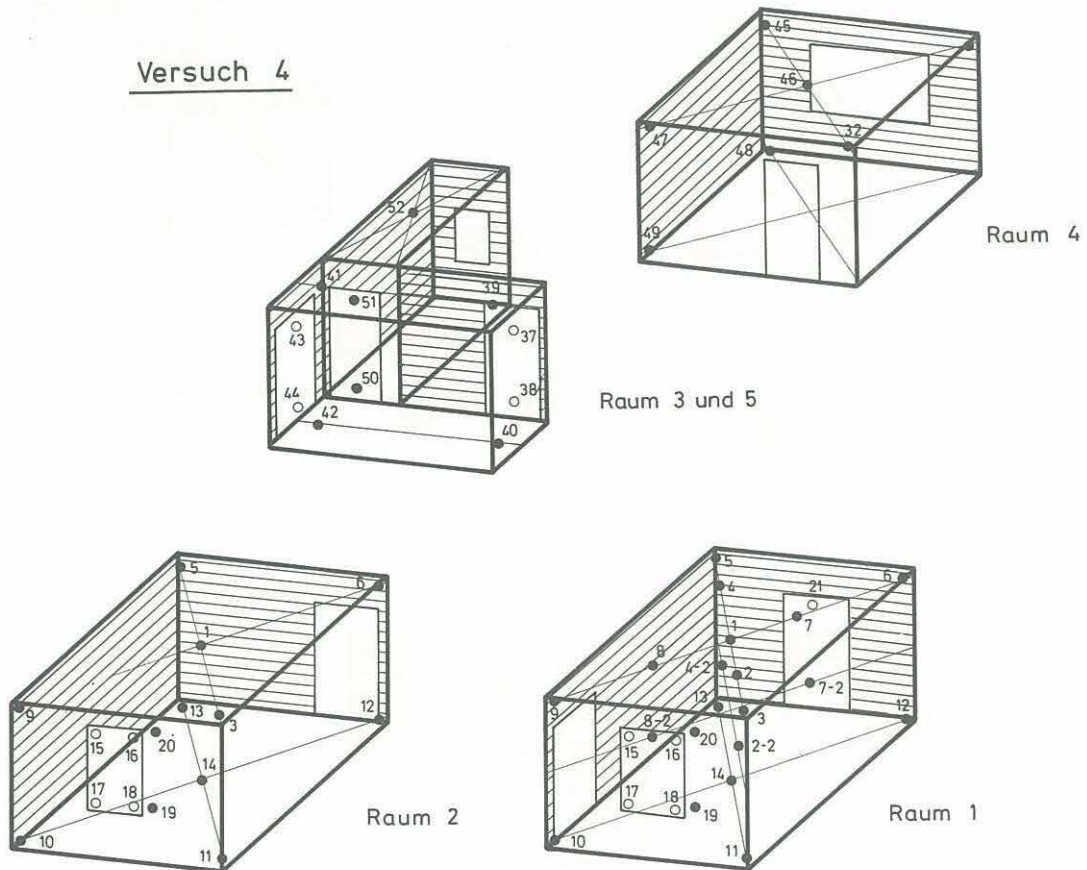


Bild 6-6: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 4

Versuch 5

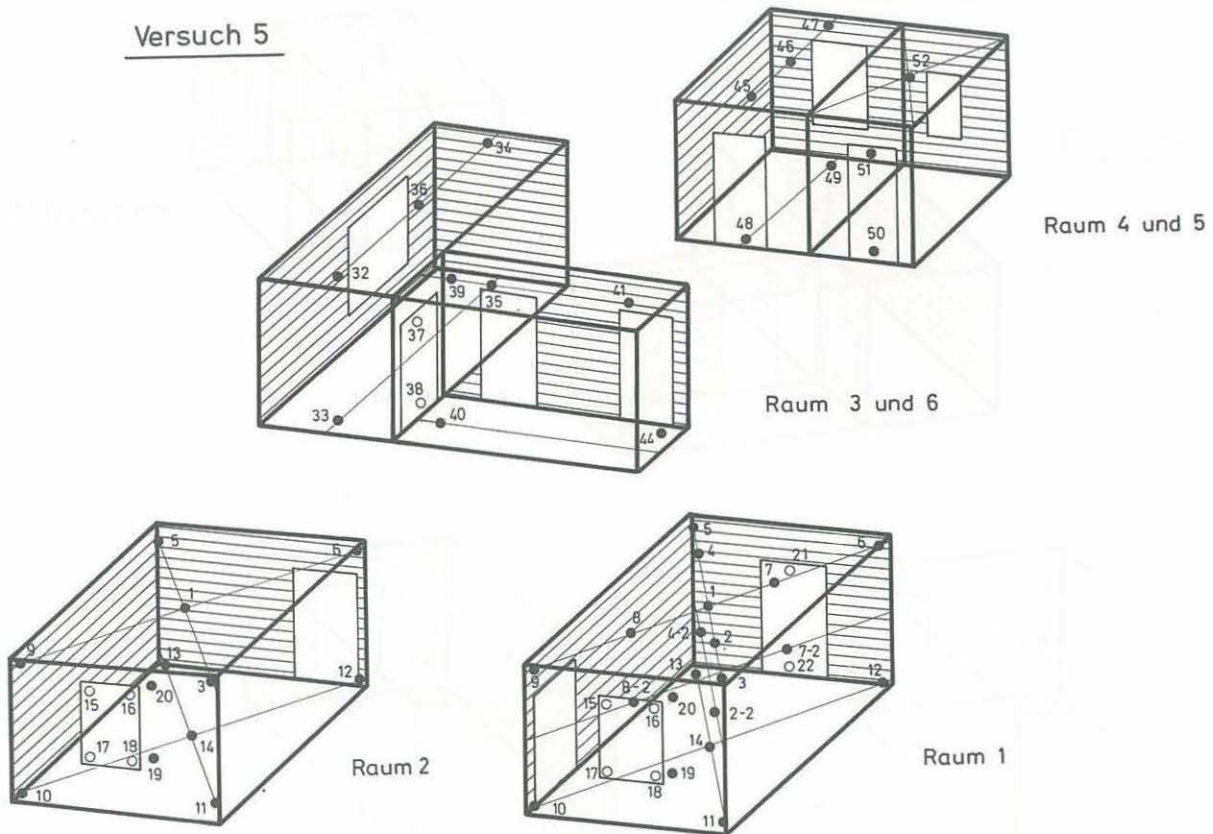


Bild 6–7: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 5

Versuch 6

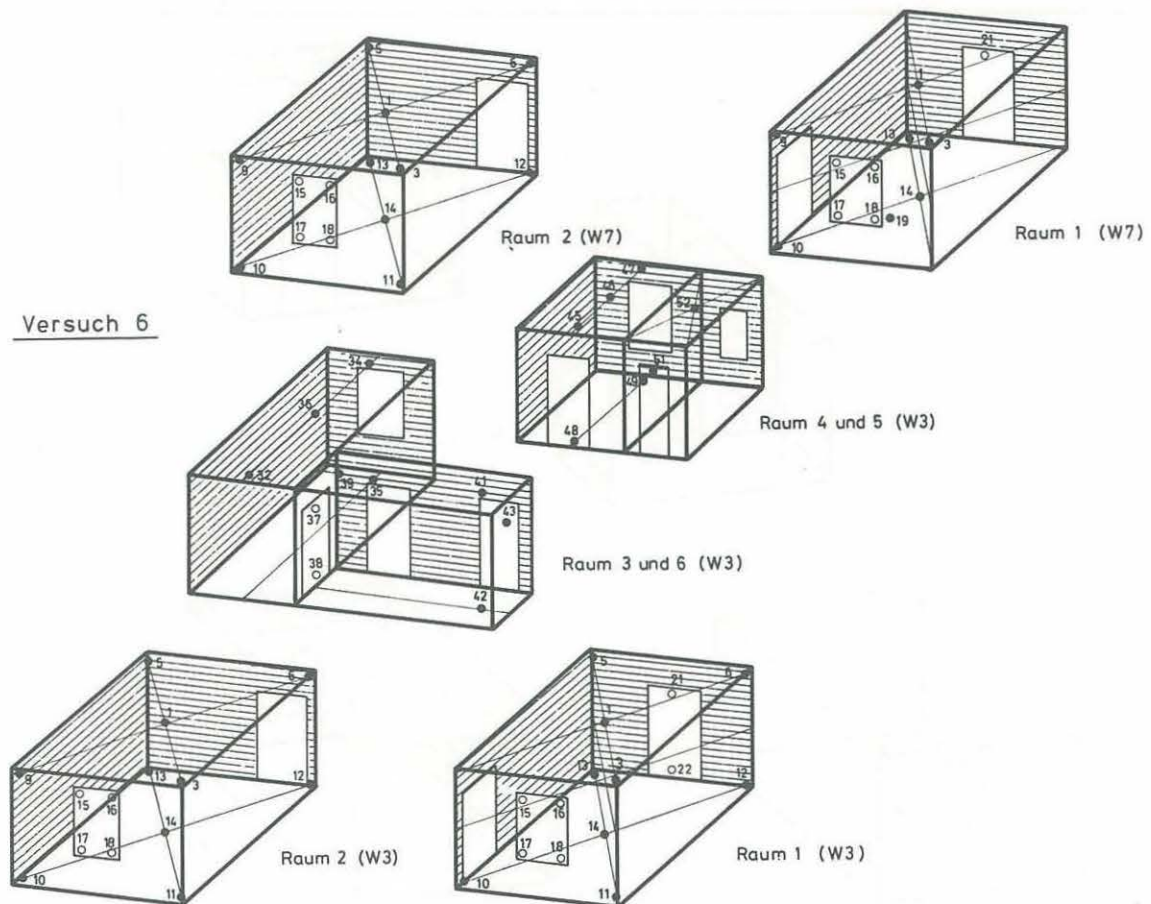
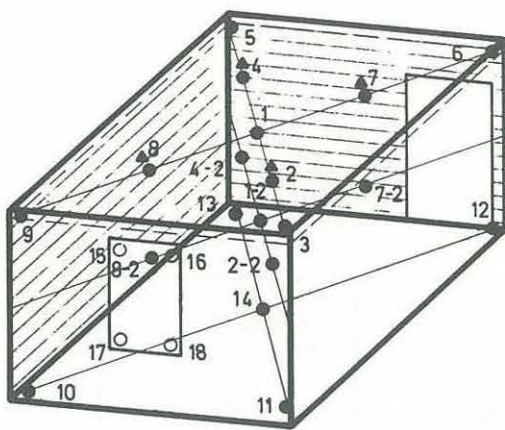
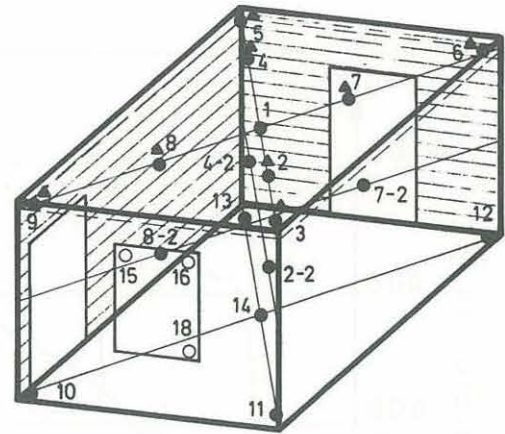


Bild 6–8: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 6

Versuch 7



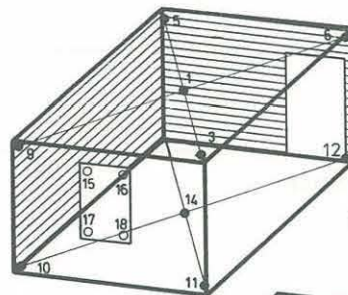
Raum 2
mit Zwischendecke



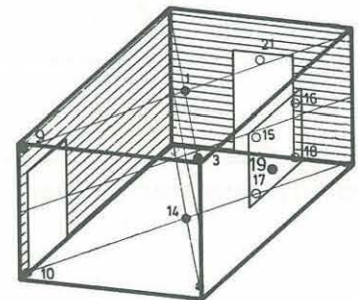
Raum 1

Bild 6–9: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 7

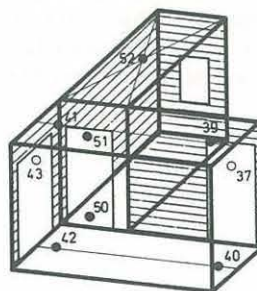
Versuch 8



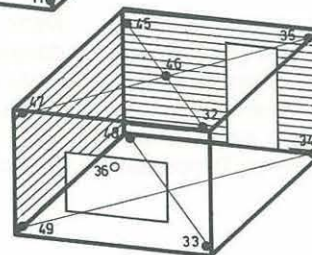
Raum 2 (W12)



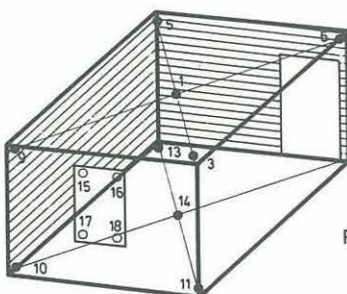
Raum 1 (W12)



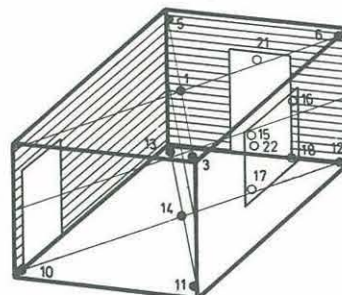
Raum 3 und 5 (W8)



Raum 4 (W8)



Raum 2 (W8)



Raum 1 (W8)

Bild 6–10: Anordnung der Temperaturmeßstellen für den Versuch 8

Anhand einiger ausgewählter Bilder soll der Temperaturverlauf, wie er im allgemeinen beobachtet wurde, erläutert

werden. Die Einzelmeßergebnisse aller Versuche sind dem Anhang zu entnehmen.

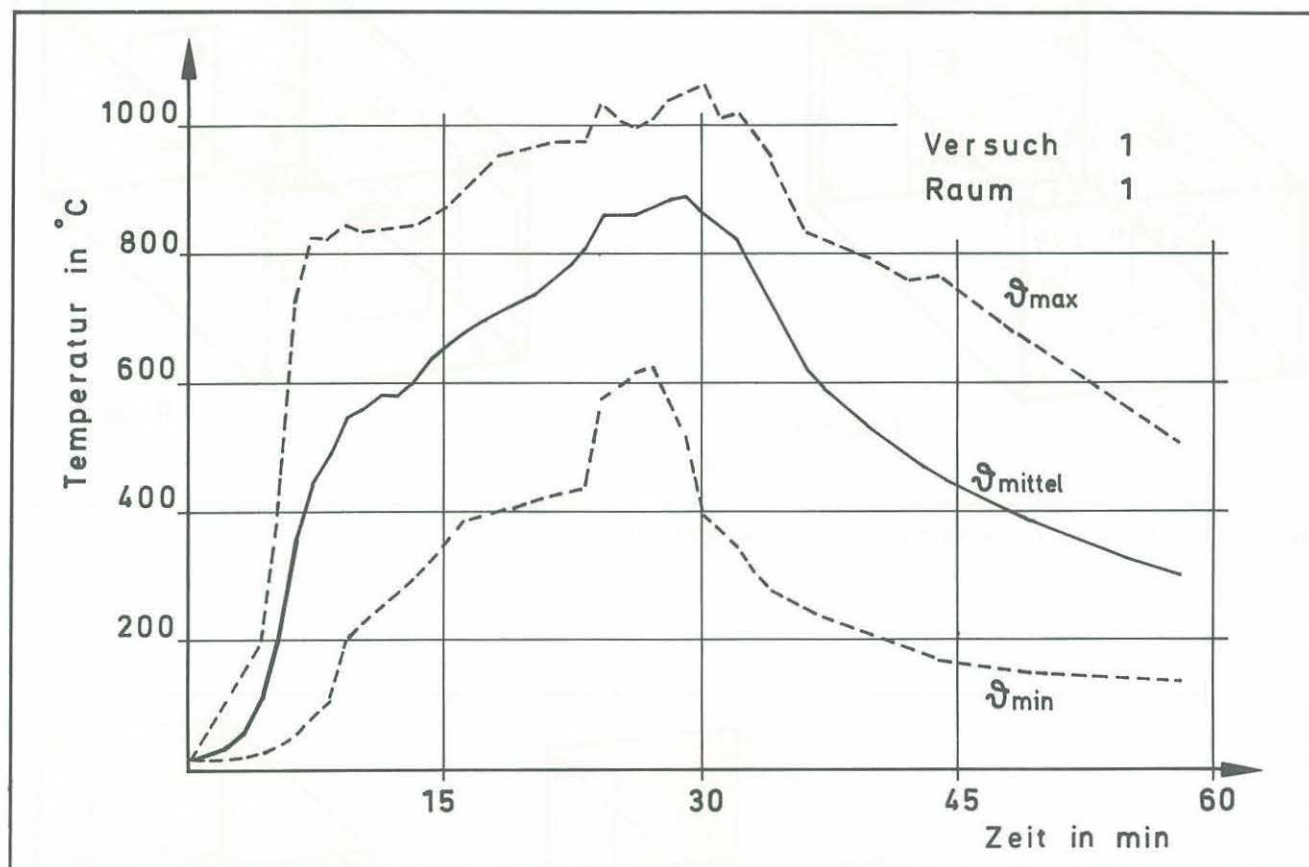


Bild 6–11: Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Bild 6–11 zeigt den typischen Temperaturstreibereich eines Brandraumes. Das Temperaturmittel ($\vartheta_{\text{mittel}}$) ergibt sich rechnerisch aus der Berücksichtigung aller Thermolemente eines Brandraumes, mit Ausnahme der Elemente an den Ventilationsöffnungen. Daneben wurden die zu jedem Zeitpunkt gemessenen maximalen und minimalen Temperatur-

werte (ϑ_{\max} und ϑ_{\min}) des Brandraumes aufgetragen. Die dargestellten Temperatur-Zeit-Kurven sind keine Meßwerte einzelner Thermolemente, sondern beschreiben den Temperaturstreibereich. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts sei der Temperaturstreibereich an der Decke eines Brandraumes wiedergegeben (Bild 6–12).

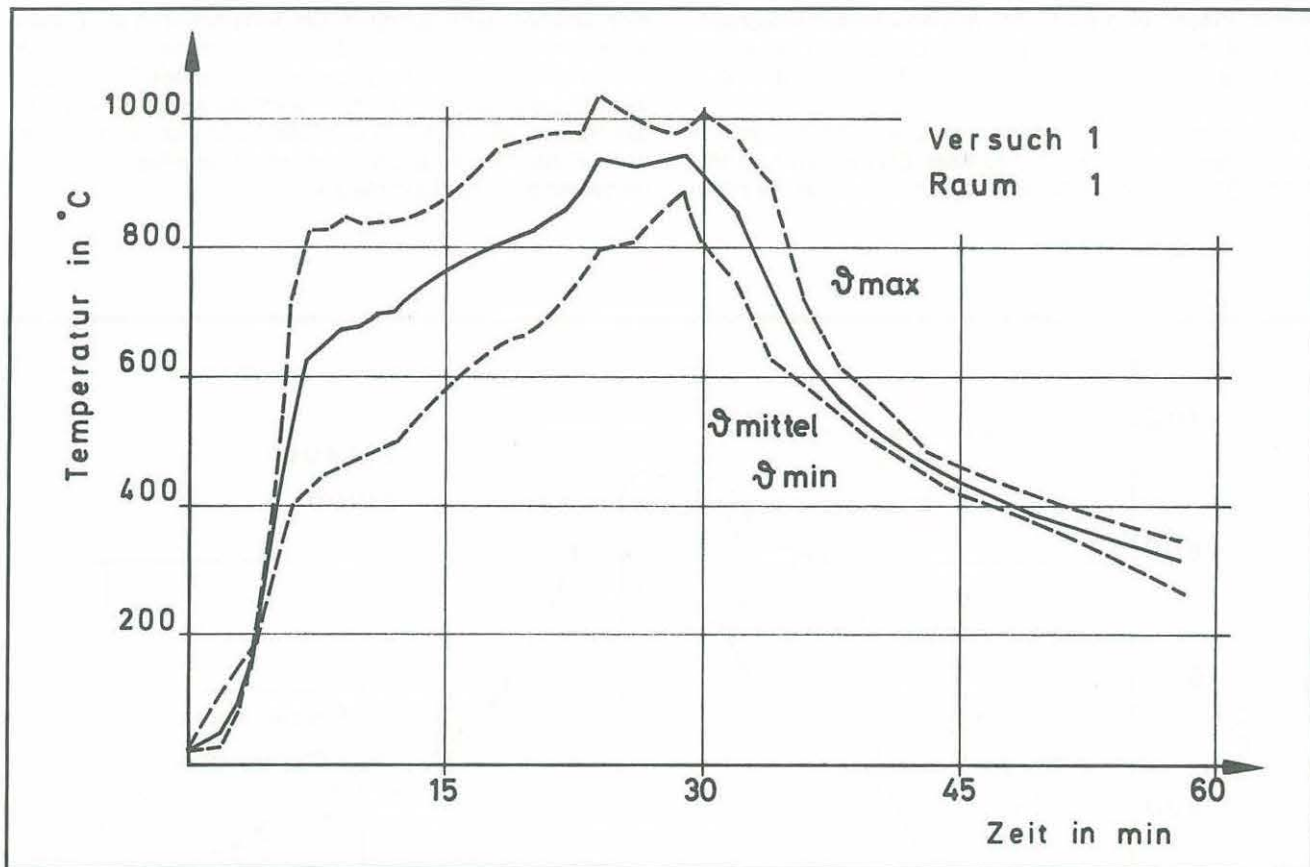


Bild 6-12: Temperaturstreibereich an der Decke eines Brandraumes

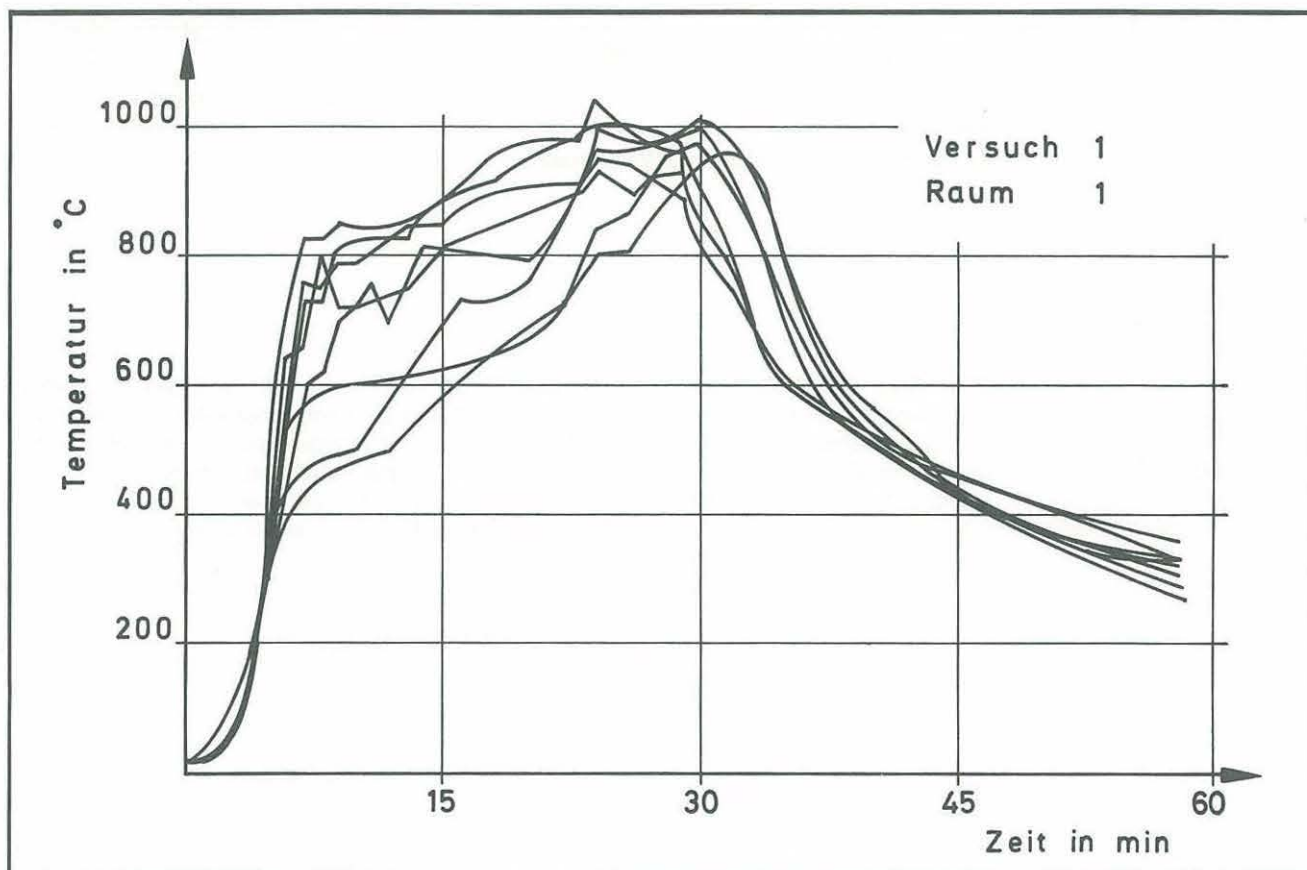


Bild 6-13: Einzelmeßergebnisse von acht Thermoelementen an der Decke eines Brandraumes

Dieser Streubereich ergibt sich aus acht Einzelmessungen, die in Bild 6–13 aufgezeigt sind. Die Lage dieser acht Elemente ist dem Meßstellenplan des Versuchs 1 (Bild 6–3) zu entnehmen.

Weiterhin wurde die Temperaturschichtung in drei bzw. je nach Versuchsraum zwei horizontalen Ebenen ermittelt (Bild 6–14). Dabei zeigte sich, daß im Deckenbereich die höch-

sten Temperaturen auftraten. Die Temperaturen am Boden eines Brandraumes lagen deutlich unter den Werten im Deckenbereich. Beim Abklingen eines Brandes überstiegen die Temperaturen am Boden jedoch die an der Decke, da die Spitzen der Boden-Thermoelemente sich 20 cm über dem Fußboden befanden und somit unmittelbar in der verglühenden Brandlast steckten.

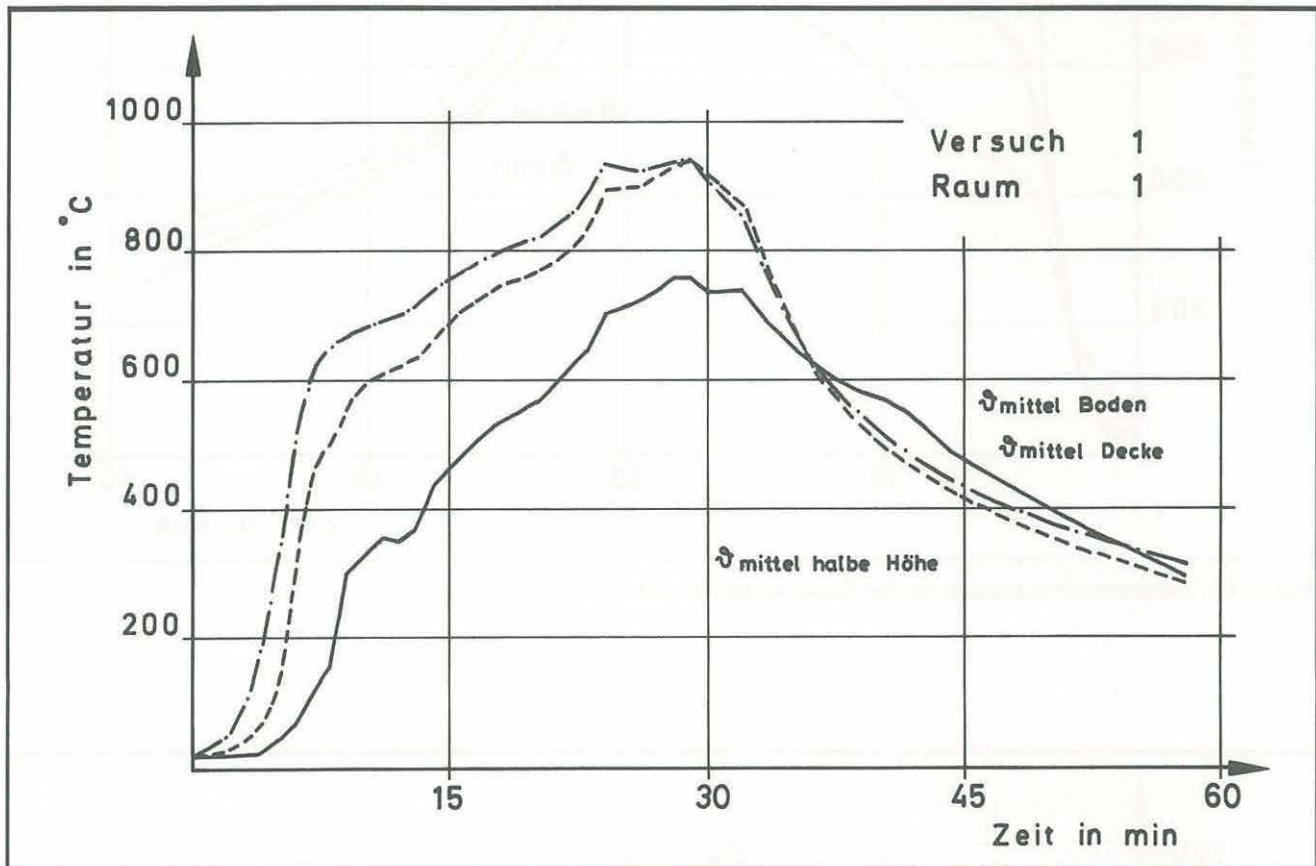


Bild 6–14: Temperaturschichtung, gemessen in drei horizontalen Ebenen

Die Bilder 6–15 und 6–16 verdeutlichen den Einfluß der Querlüftung bei Brandräumen. Während bei einem Raum mit nur einem geöffneten Fenster sich die Temperaturen am Fenstersturz und an der Fensterbank deutlich unterscheiden (Bild 6–15), zeigen bei querbeflühten Räumen die gleichen Temperaturmeßstellen fast identische Temperatu-

ren an (Bild 6–16). Im ersten Fall verließen die heißen Rauchgase den Brandraum am Fenstersturz, an der Fensterbank strömte kalte Umgebungsluft in den Raum. Im zweiten Fall wurde die zur Verbrennung benötigte Luft aus den benachbarten Räumen angesaugt. Die Rauchgase verließen den Raum über den gesamten Fensterquerschnitt.

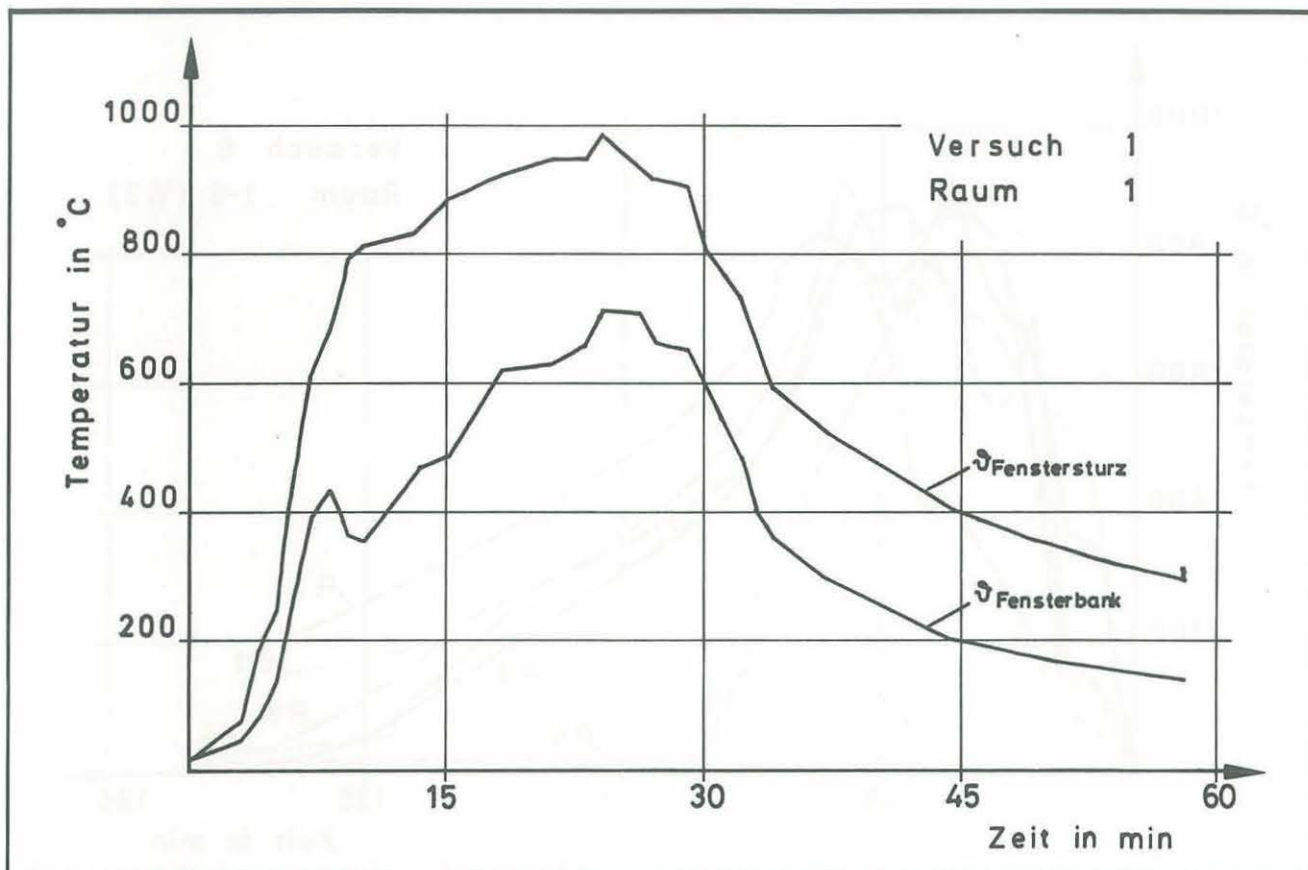


Bild 6-15: Temperaturen in Fensternähe, Versuch 1

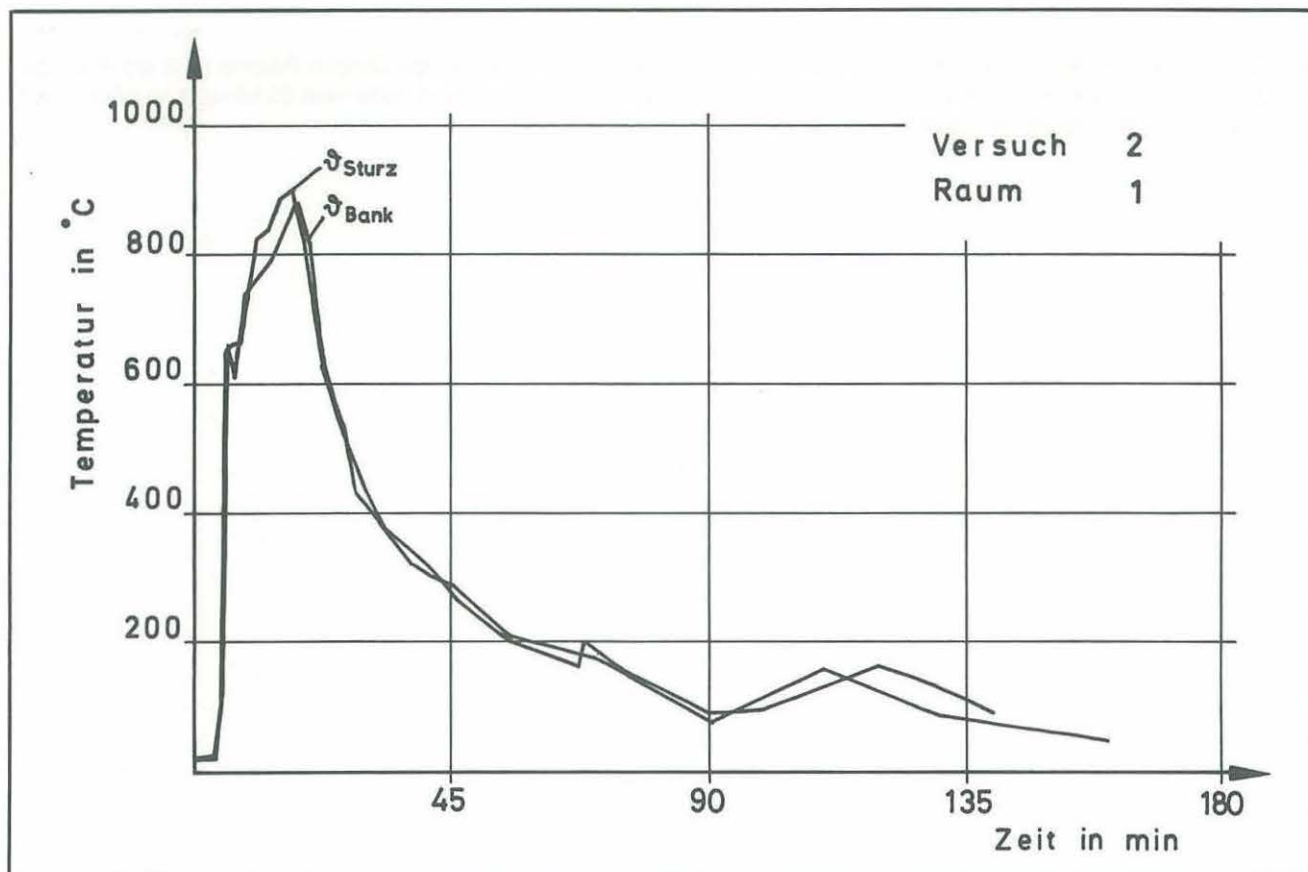


Bild 6-16: Temperaturen in Fensternähe, Versuch 2

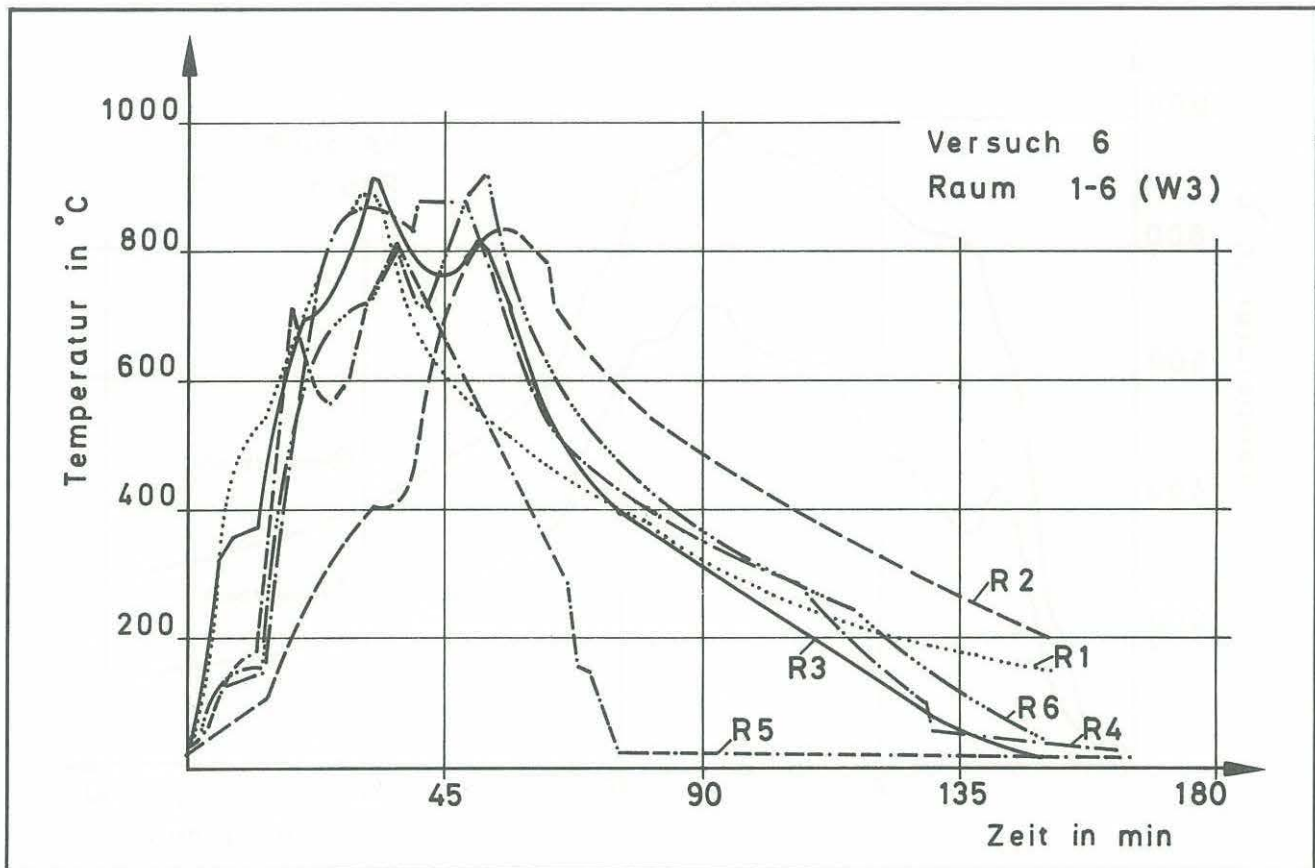


Bild 6-17: Brandentwicklung und Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

Die Abhängigkeit der Brandausbreitung vom Wind wird in den Bildern 6-17 und 6-18 deutlich.
Nach der Brandentzündung in Raum 1 (R 1) breitete sich

das Feuer sofort in die übrigen Räume (R 2 bis R 6) aus (Bild 6-17). Der Brand hatte nach 60 Minuten sein Maximum überschritten.

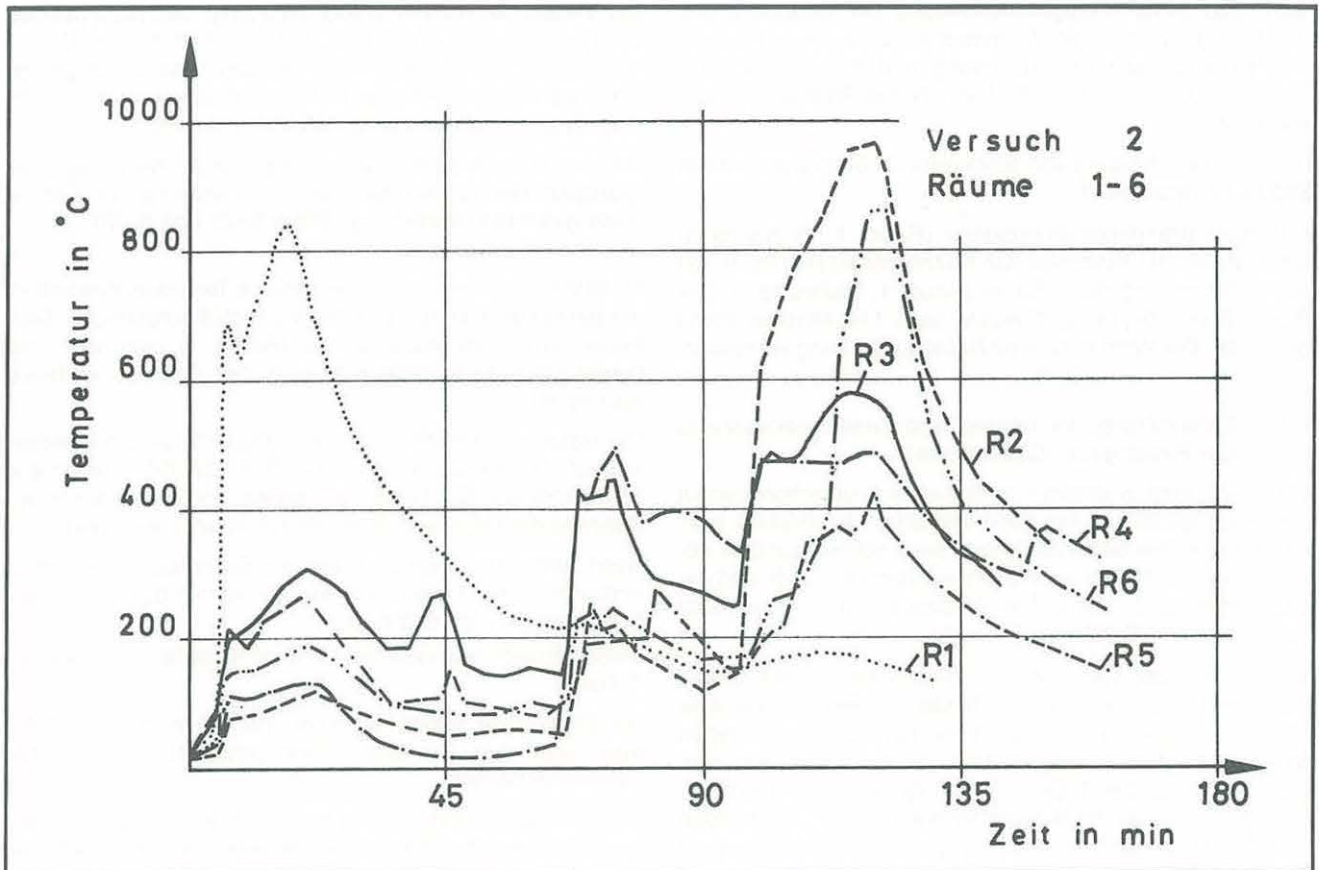


Bild 6-18: Brandentwicklung und Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

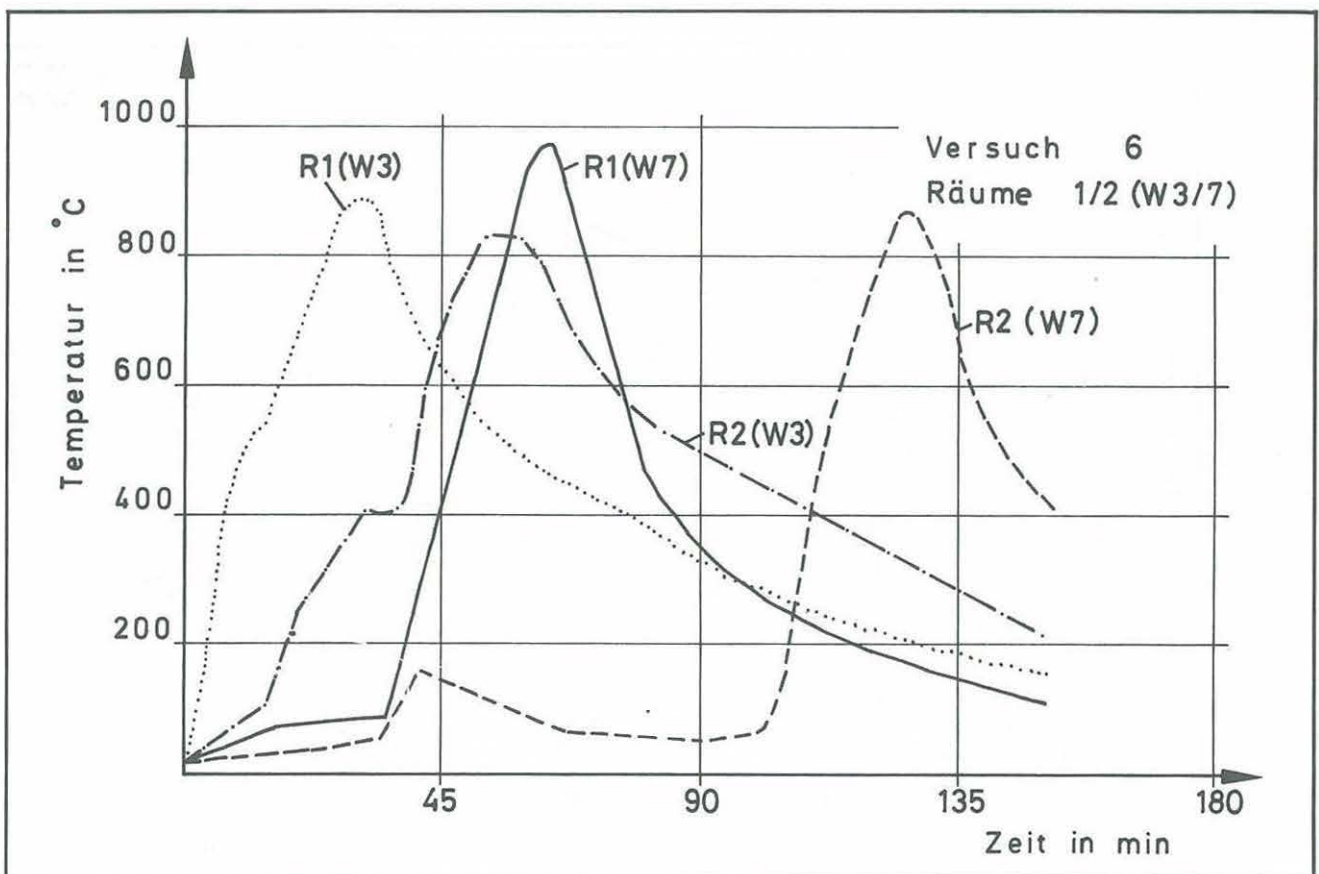


Bild 6-19: Feuerübersprung von Stockwerk zu Stockwerk (mittlere Brandraumtemperaturen)

Nach Bild 6–18 hingegen verhinderte bei Versuch 2 der Wind ein Übergreifen der Flammen auf die anderen Räume, so daß erst nach Fremdzündung und Einschlagen von Fensterscheiben die Brandlast der übrigen Räume ebenfalls abbrannte.

Die Brandübertragung von Stockwerk zu Stockwerk wird in Bild 6–19 verdeutlicht.

Aus dem Brandentstehungsraum (Raum 1, Wohnung 3) entzündeten die Flammen den Nachbarraum (Raum 2) und einen darüberliegenden Raum (Raum 1, Wohnung 7). Der Raum 2 der Wohnung 7 wurde nach 110 Minuten fremd gezündet. Der Wind hatte eine Brandausbreitung verhindert.

6.1.2. Entwicklung, Verteilung und Zusammensetzung der Rauchgase (Gasanalyse)

Bild 6–20 zeigt in einem Brandraum den typischen Verlauf der Gasanalyse, der bei allen Versuchen beobachtet werden konnte. Der Sauerstoffgehalt sank schnell auf 0 % ab, der CO₂-Gehalt stieg auf Werte zwischen 18 – 22 % und der CO-Gehalt auf 5 – 10 %. Der Streubereich der Meßwerte ist von der Art der Belüftung abhängig.

Von den bei der Verbrennung entstehenden Gasen ist das Kohlenmonoxid von entscheidender Bedeutung, da eine Raumkonzentration von nur 1 % bereits nach wenigen Minuten zur Bewußtlosigkeit führt und somit eine selbständige Flucht vor den Flammen unmöglich wird. Die Statistik besagt, daß 80 % der Brandopfer durch Rauchvergiftungen den Tod finden und nicht durch die direkte Berührung mit Flammen.

Der Verlauf der Kurven in Bild 6–20 zeigt, daß nicht nur der CO-Gehalt eine Gefahr bedeutet, sondern daß z. B. bei Rettungsversuchen die Rettungsmannschaften unbedingt ein unabhängiges Atemgerät tragen müssen, da in einem Brandraum der Sauerstoffgehalt auf Null sinkt.

Bei der Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung sind bezüglich der Gaskonzentration bemerkenswerte Ergebnisse gefunden worden (vgl. Bilder 6–21 und 6–22).

In diesen Diagrammen ist der mittlere Temperaturverlauf in der gesamten Wohnung für den Versuch 3 aufgetragen. Das Feuer wurde im Wohnzimmer (Raum 1) gezündet und breitete sich nach einer gewissen Zeit über die anderen Räume aus.

Die Gasanalyse im Schlafzimmer (Raum 2) zeigt folgenden Verlauf: Der O₂-Gehalt sinkt auf 10 %, der CO₂-Gehalt auf 15 % und der CO-Gehalt auf bereits tödliche 3 bis 4 %, während die Raumtemperaturen nur kaum zunehmen.

Nach einer gewissen Zeit war die Brandlast im Raum 2 entflammt und verhielt sich wie die vorher beschriebenen Brandabläufe (vgl. Bild 6–20).

Dieses Ergebnis konnte bei Versuch 4 bestätigt werden (s. Anhang).

Die Ergebnisse lassen vermuten, daß auch in einer Wohnung über dem Brandraum eine unmittelbare Gefahr für Menschen herrscht.

Beim Versuch 6 installierten wir daher eine Gasentnahme-sonde in dem über dem Brandentstehungszimmer befindlichen Schlafzimmer (Raum 2).

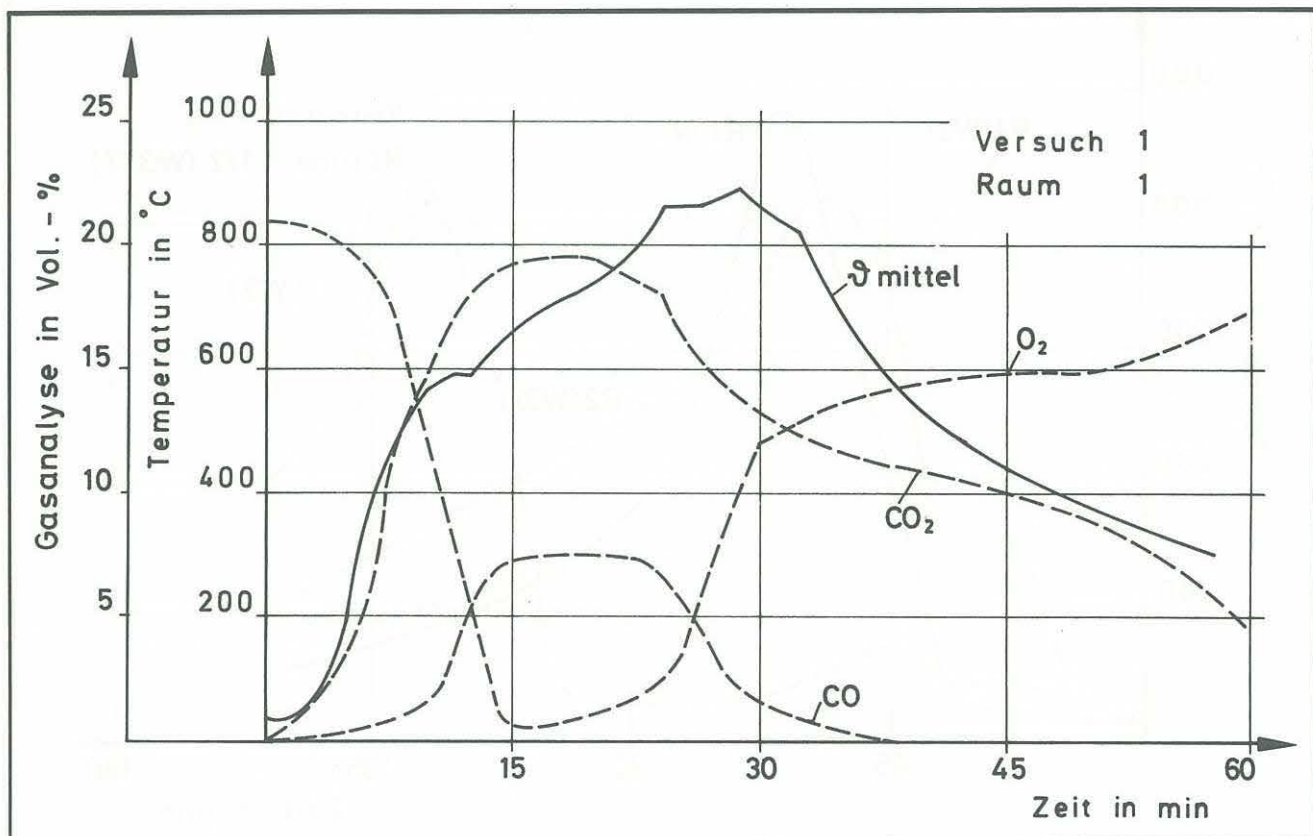


Bild 6–20: Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse, Versuch 1

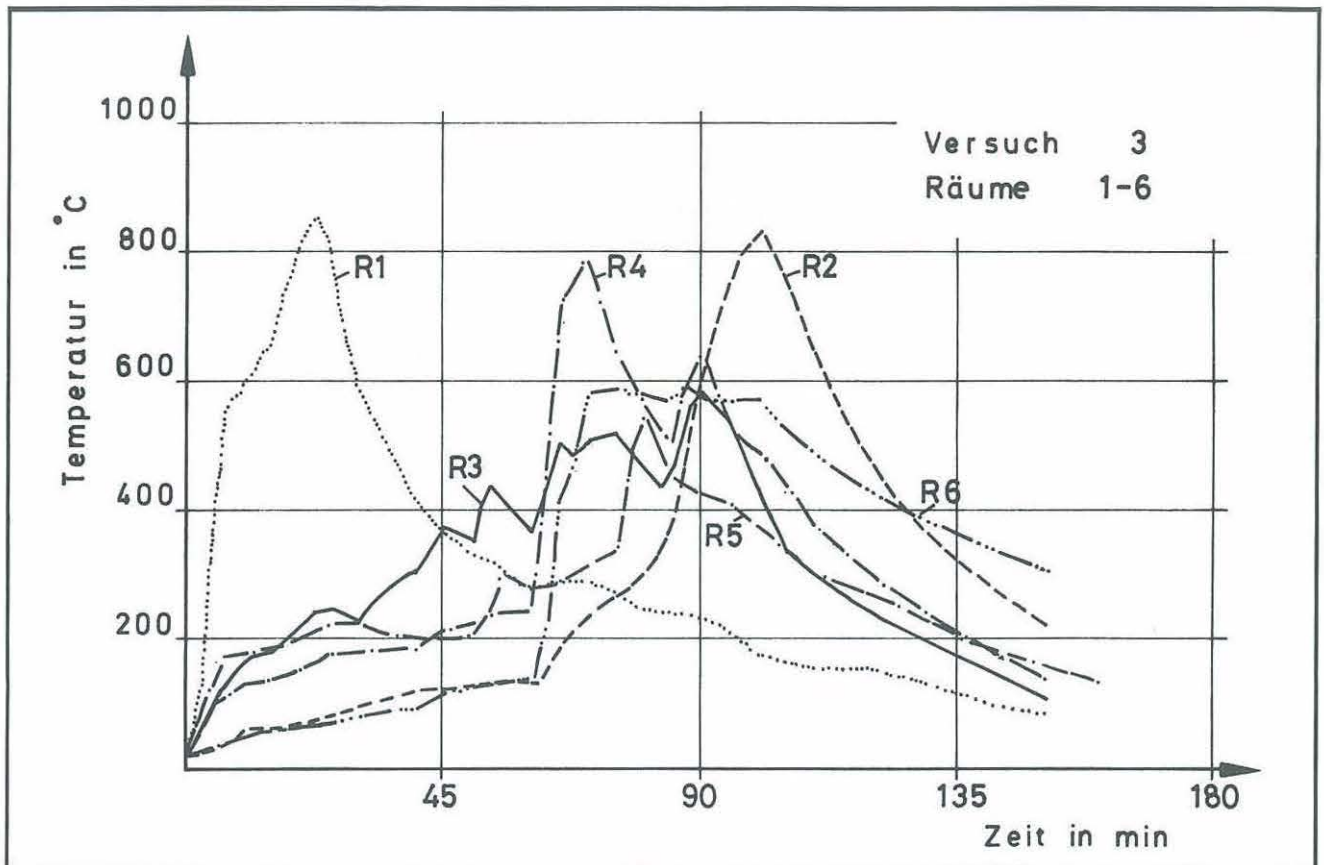


Bild 6-21: Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

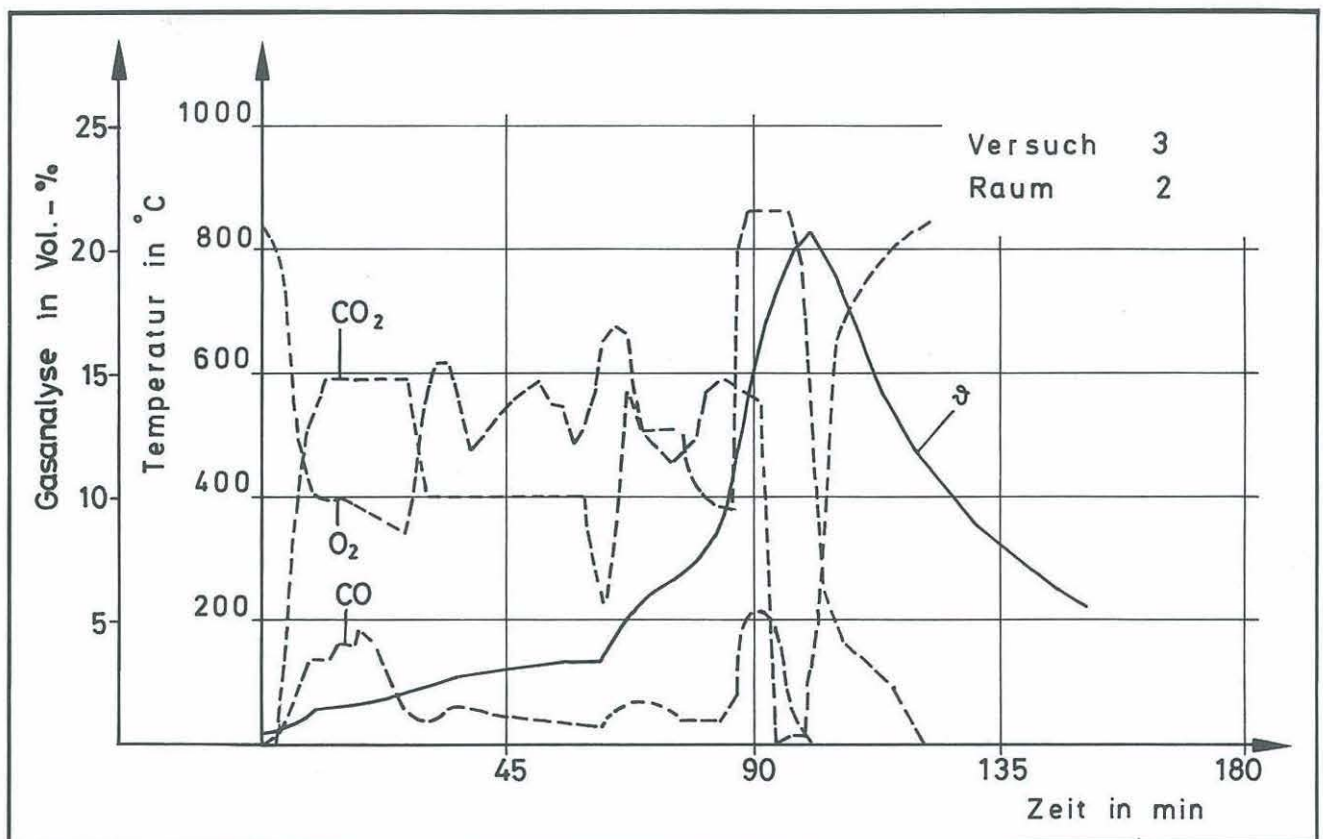


Bild 6-22: Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse, Versuch 3

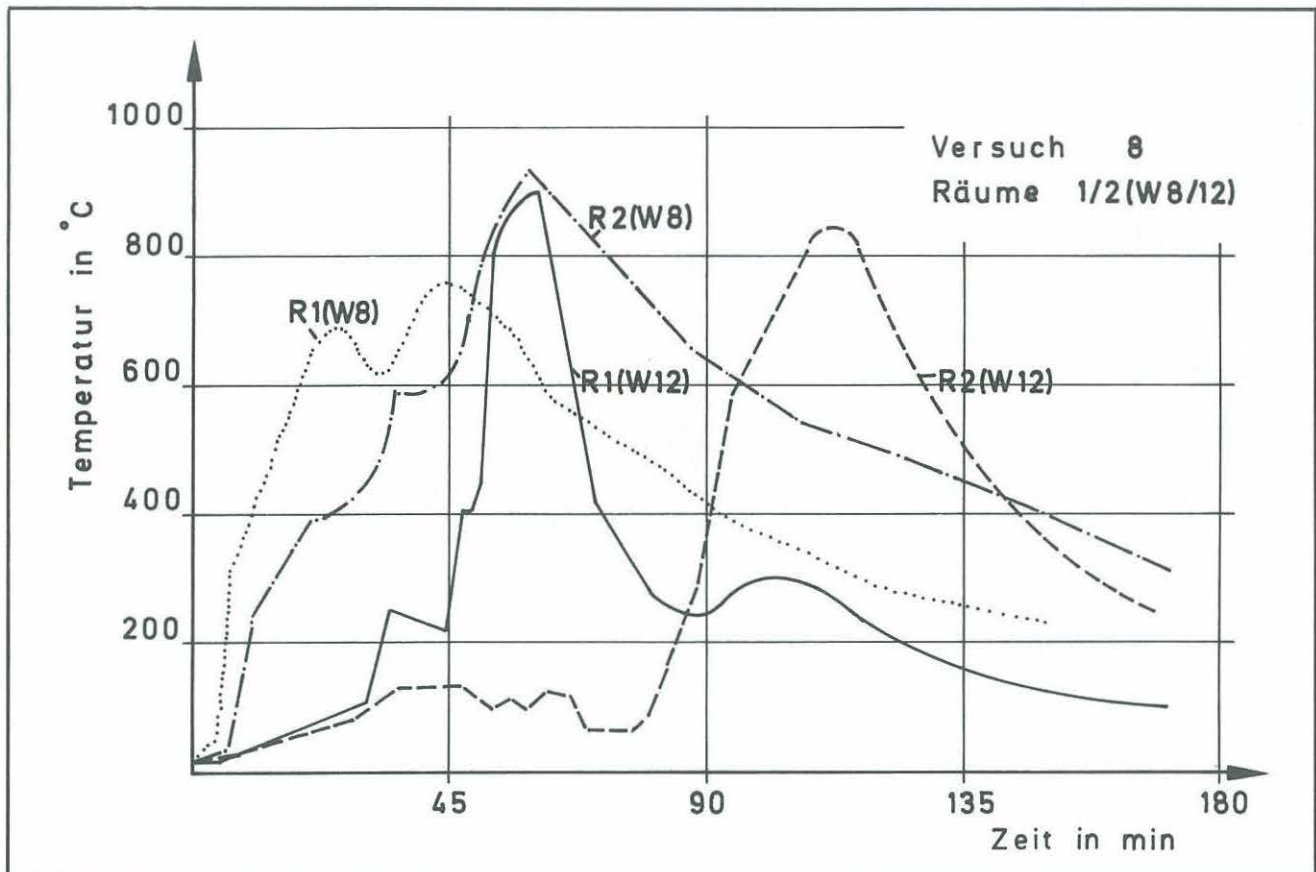


Bild 6-23: Feuerübersprung von Stockwerk zu Stockwerk (mittlere Brandraumtemperaturen)

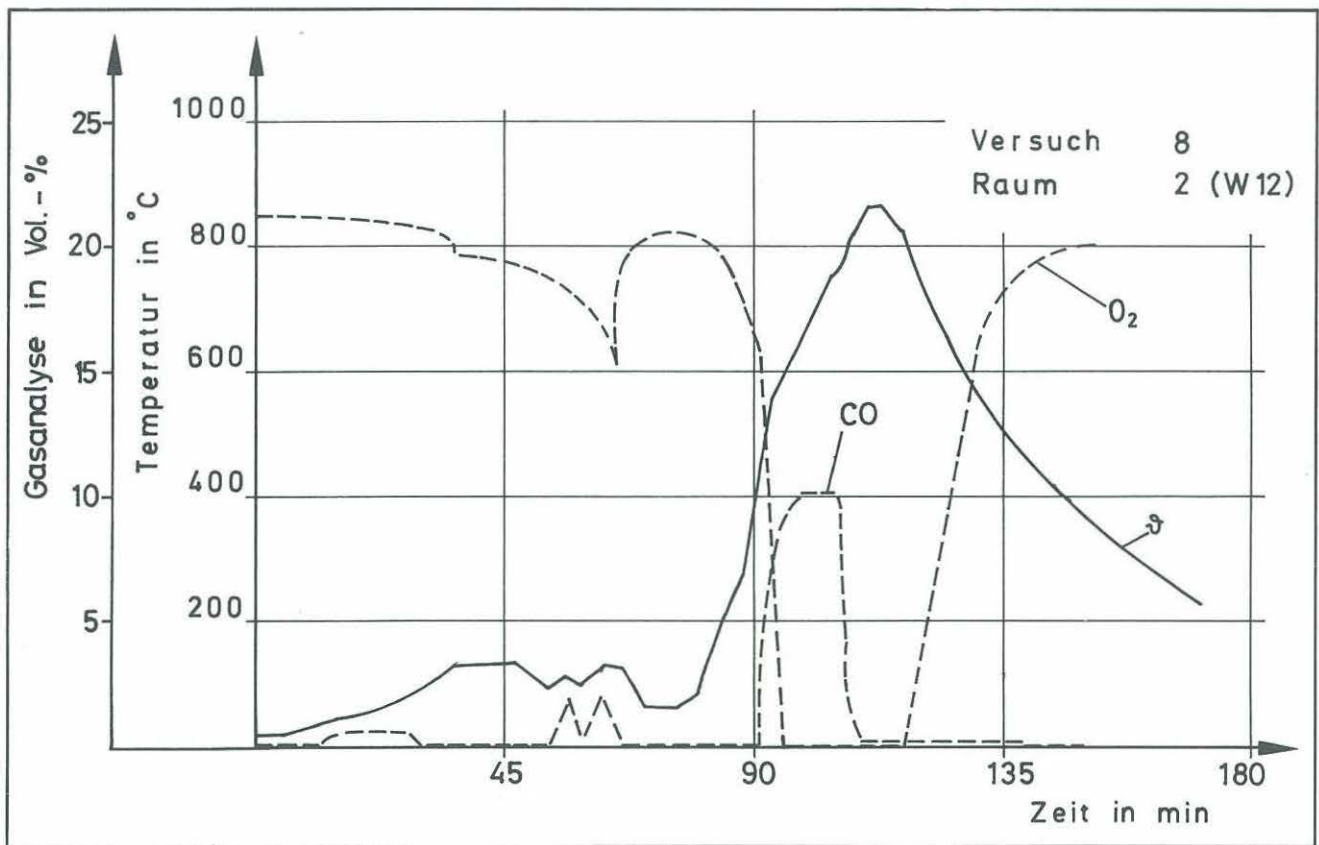


Bild 6-24: Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse, Versuch 8

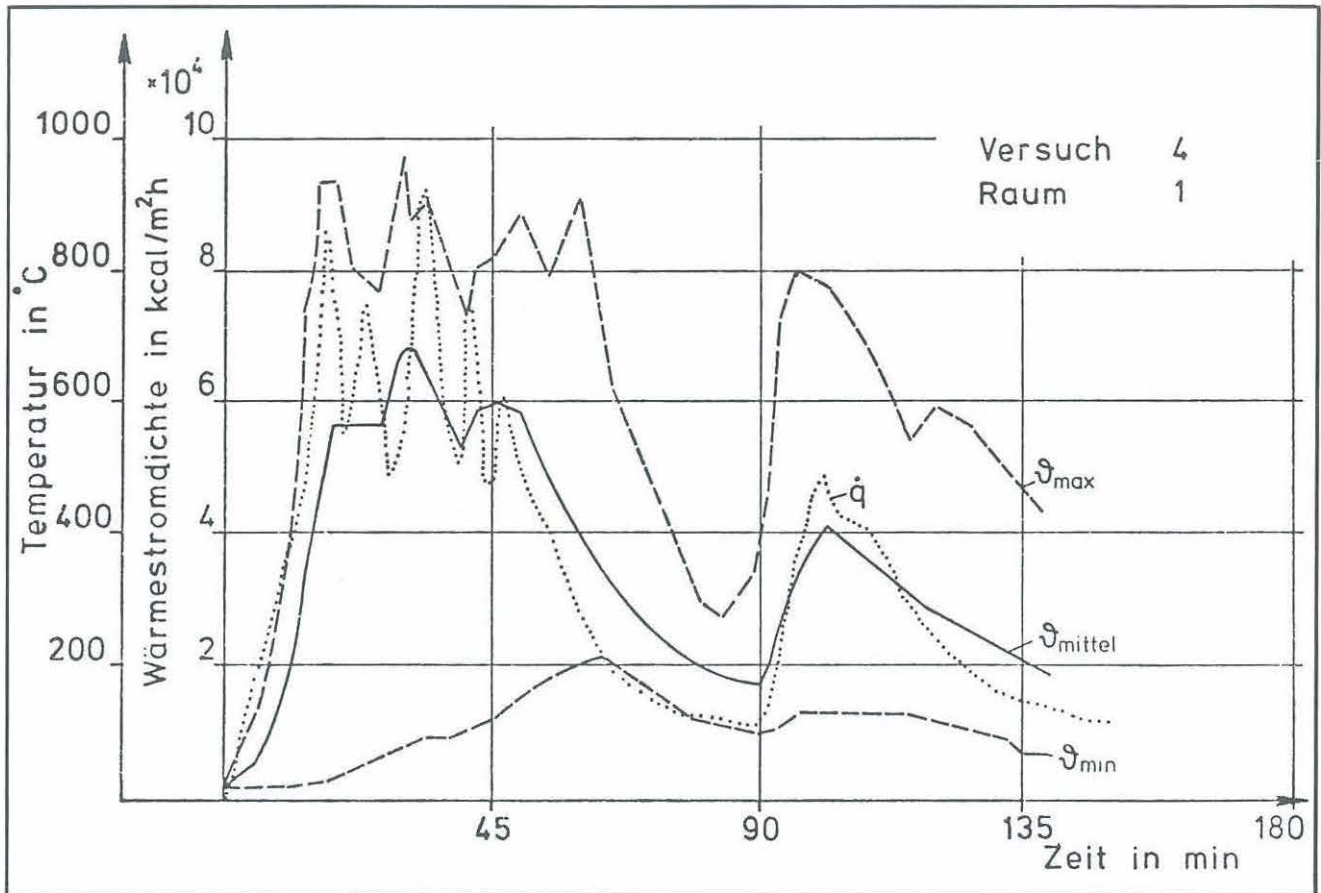


Bild 6-25: Temperaturstreibereich und Wärmestromdichte in einem Brandraum

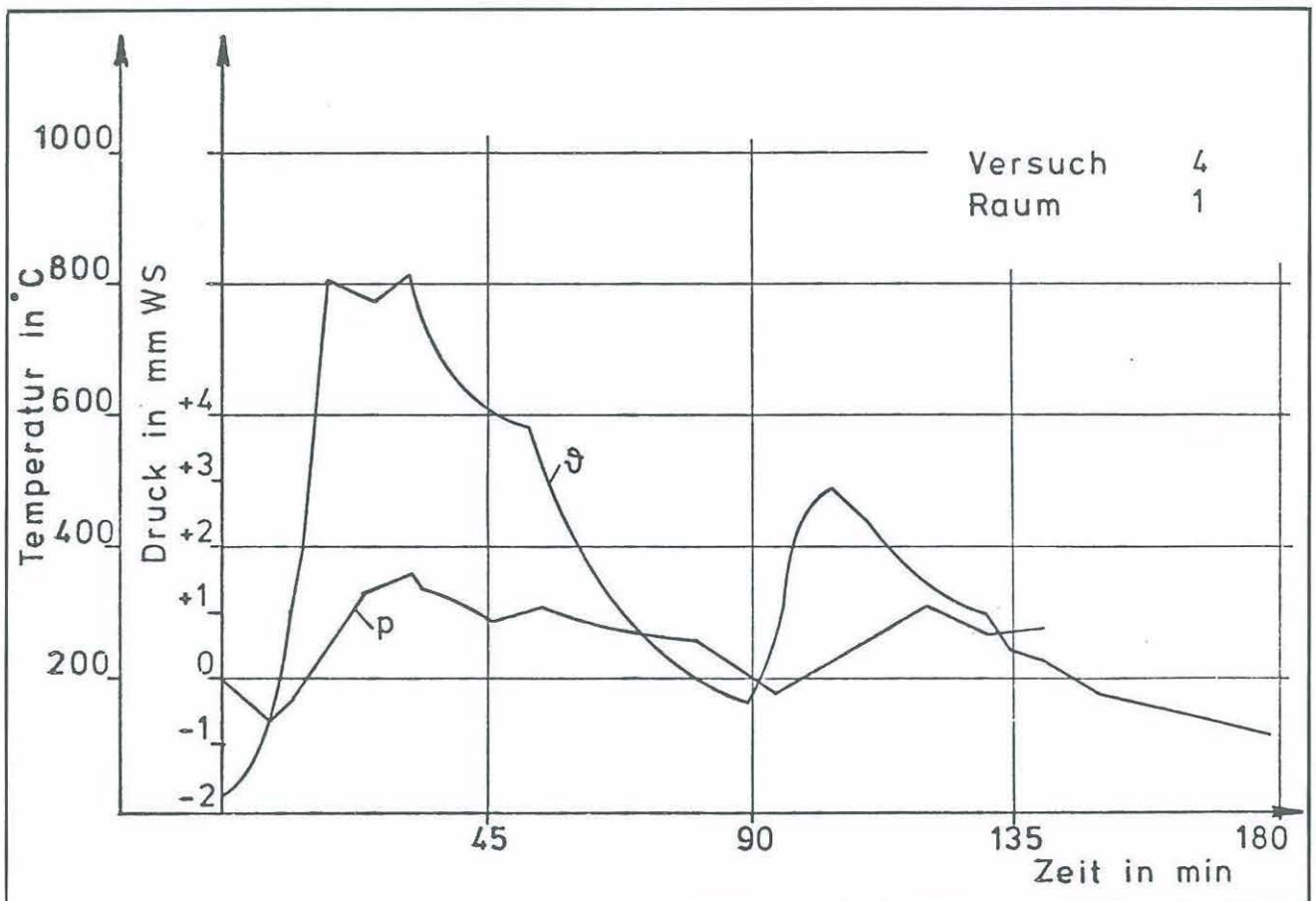


Bild 6-26: Temperatur und Druck einer Meßstelle

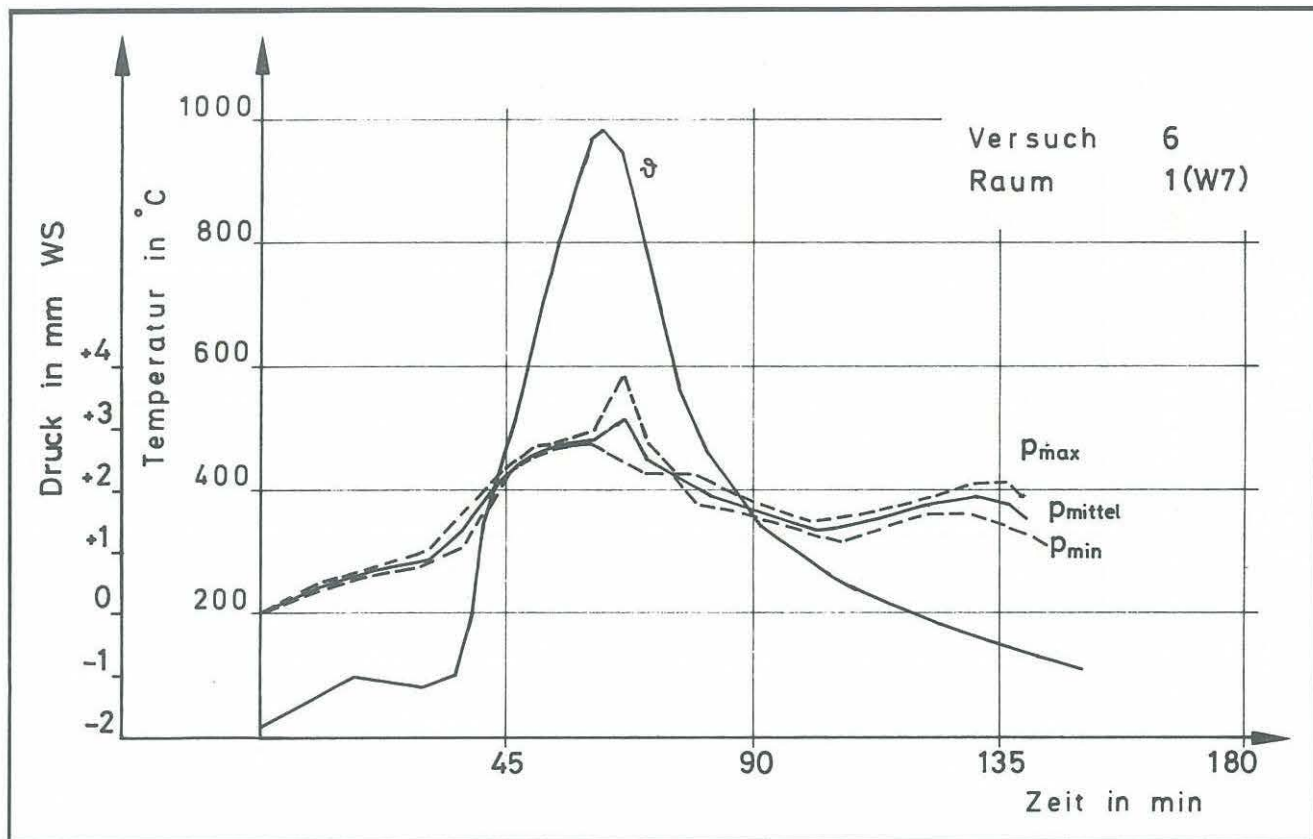


Bild 6-27: Mittlere Temperatur und Druckstreibereich unter der Decke

Der Temperaturverlauf zeigt, daß dieser Raum erst nach über 90 Minuten entflammte (Bild 6-23); die CO-Konzentration aber bereits vor der Entflammung gefährliche Werte annahm (Bild 6-24).

Der O₂-Gehalt sank während dieser Phase ebenfalls ab.

Zur Bestätigung dieses Ergebnisses wurde diese Versuchsanordnung im Versuch 8 wiederholt (s. Anhang).

6.1.3. Kalorimetrische Messung von Wärmestromdichten

Das Ergebnis einer Messung mit dem Kalorimeter ist in Bild 6-25 wiedergegeben. Darin sind der Temperaturstreibereich des Brandraumes und die Wärmestromdichte aufgetragen.

Die Empfindlichkeit des Meßgeräts ist deutlich zu erkennen. Es muß aber erwähnt werden, daß die dargestellte Wärmestromdichte die an das Kalorimeter übertragene Wärme wiedergibt und nicht die Wärmemenge, die an die Wände übertragen wurde, da die Oberflächentemperatur des Kalorimeters unter 100°C lag. Weitere Messungen haben ergeben,

daß die Wärmebelastung einer Wand in einem Brandraum um ca. eine Zehnerpotenz niedriger liegt, da die Temperaturdifferenz zwischen Brandherd und den Brandraumwänden als treibendes Potentialgefälle durch die Aufheizung der Wände erheblich niedriger ist.

6.1.4. Luftdruckdifferenzen zwischen Brandraum und der vom Feuer nicht beeinflussten Umgebung

Bild 6-26 zeigt den typischen temperaturabhängigen Druckverlauf einer Meßstelle in halber Raumhöhe. Jede Druckmeßstelle war einer Temperaturmeßstelle zugeordnet. Insgesamt konnten pro Versuch 20 Druckmeßstellen installiert werden.

Durch die Vielzahl von Druckmeßstellen war es möglich, Druckprofile in einem Brandraum zu erstellen. Dabei zeigte sich, daß der Druck unter der Decke stets am höchsten war (bis zu 4 mm WS), während am Fußboden je nach Ventilationsbedingungen Unterdrücke bis zu 2 mm WS auftraten. Bild 6-27 gibt den Druckstreibereich an der Decke wieder.

Die weiteren Einzelmessergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen.

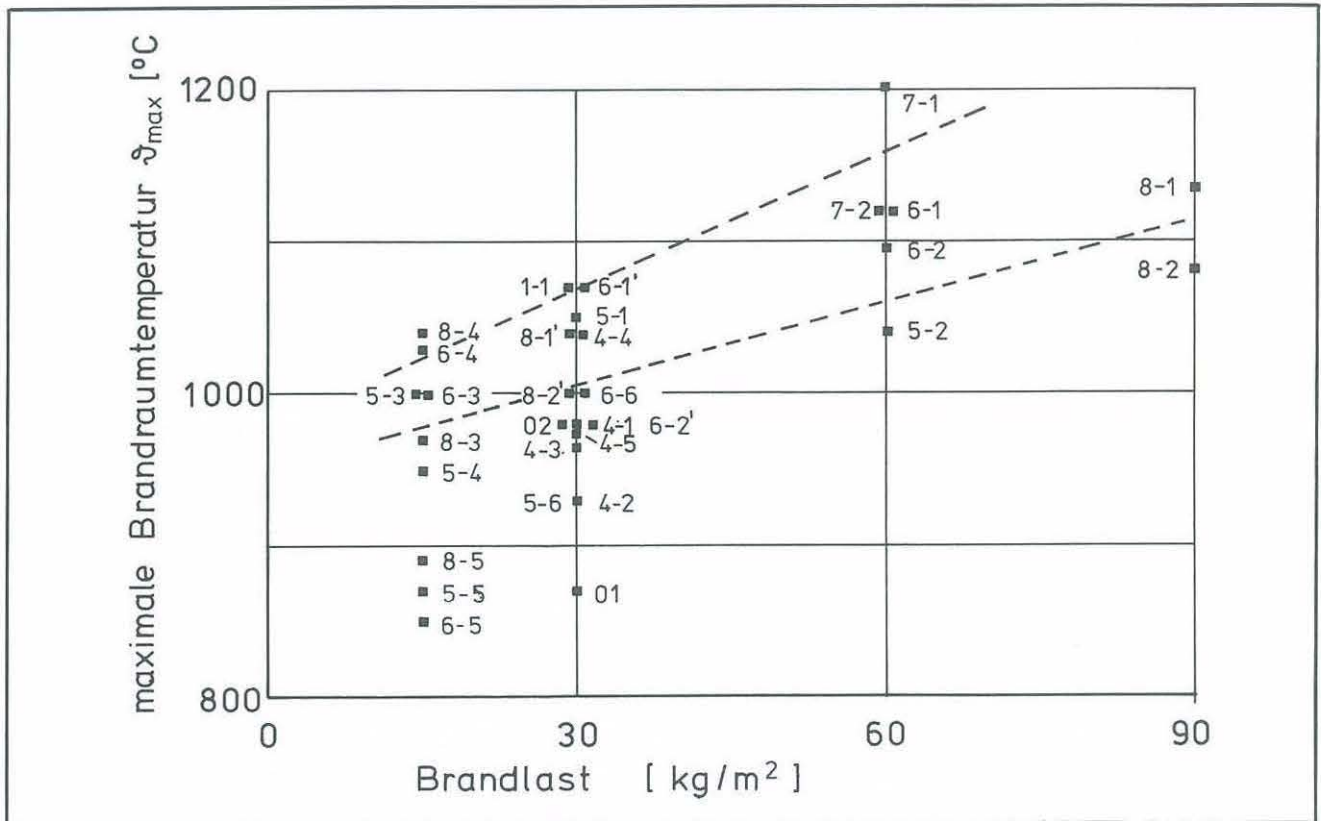


Bild 6-28a: Maximale Brandraumtemperatur in Abhängigkeit von der Brandbelastung

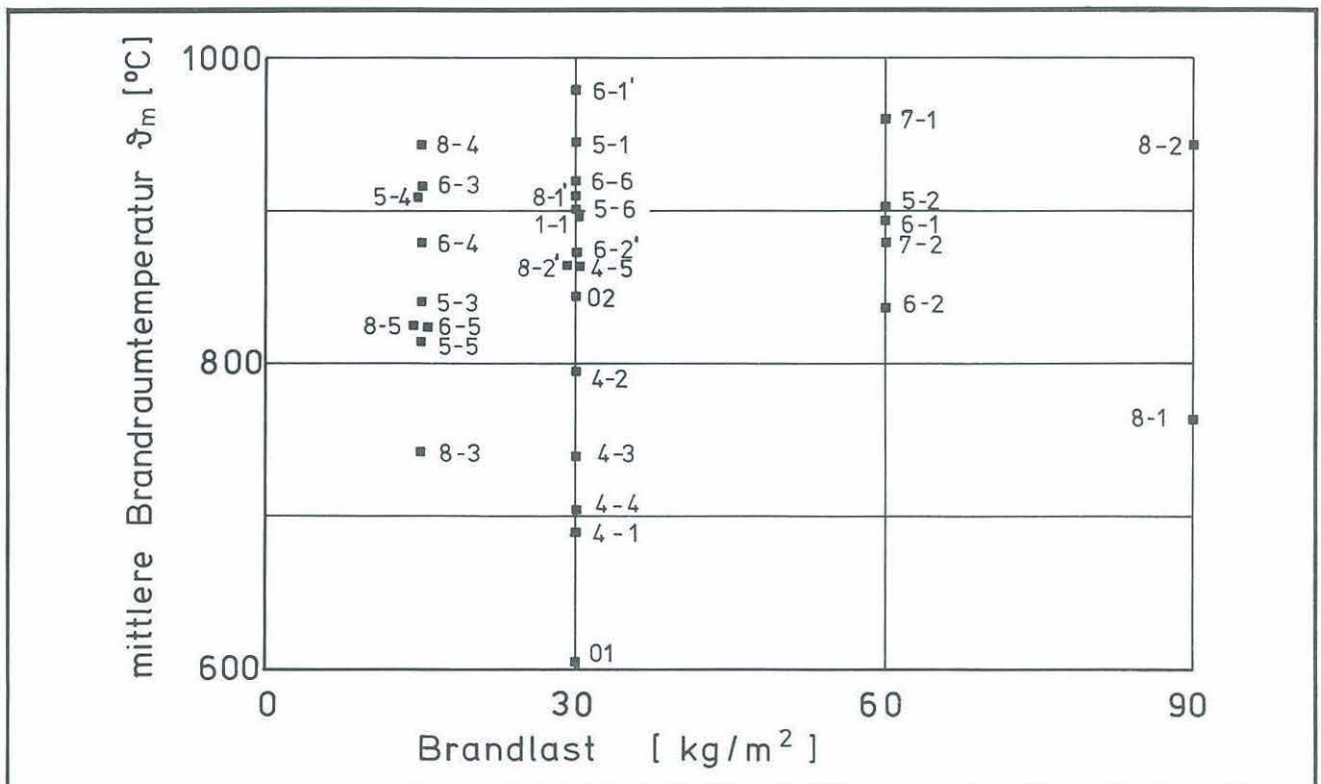


Bild 6-28b: Maximalwerte der mittleren Brandraumtemperatur in Abhängigkeit von der Brandbelastung

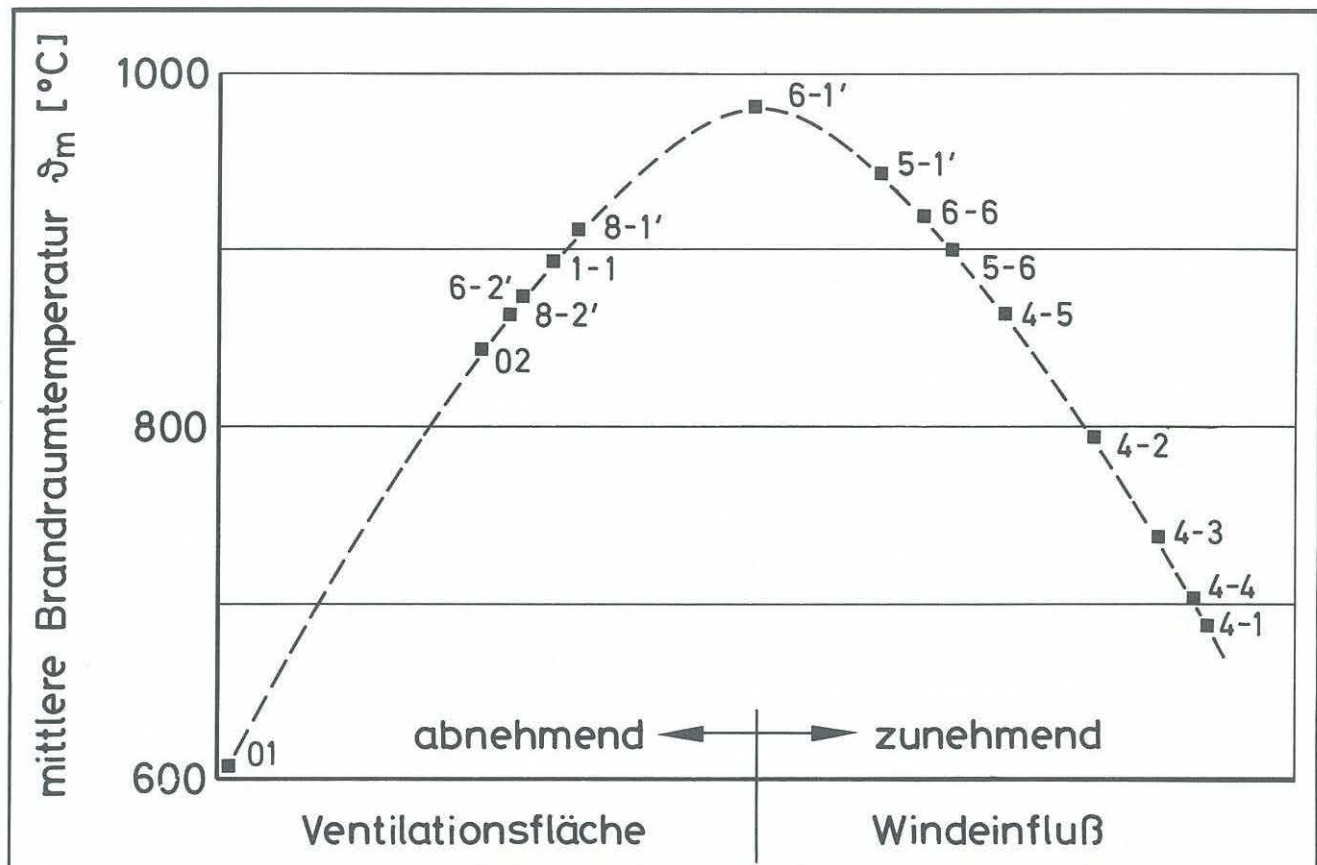


Bild 6-29: Mittlere Brandraumtemperatur in Abhängigkeit von der Ventilationsbedingung (Brandbelastung 30 kg/m²)

6.1.5. Wertung der Ergebnisse

Eine gemeinsame Darstellung aller während der Versuche registrierten Maxima der Brandraumtemperaturen ist in Bild 6-28 wiedergegeben. Aufgetragen wurden die jeweils absoluten (Bild 6-28a) und mittleren Maxima (Bild 6-28b) der Brandraumtemperaturen gegenüber der Brandbelastung.

Die den Meßpunkten zugeordneten Zahlen geben die Versuchsnummer und den Brandraum wieder. Beistriche an den Zahlen bedeuten, daß es sich bei den Versuchen 6 bzw. 8 um die jeweils oben liegende Wohnung handelt.

Beide Teilbilder zeigen deutlich, daß man trotz gleicher Brandlast keine einheitliche Temperatur für einen Brandraum angeben kann. In diese Bilder sind die Ergebnisse der Versuche mit natürlichem Mobiliar nicht eingezeichnet, um einen weiteren Parameter auszuschließen. Die Ergebnisse der Versuche 2 und 3 würden sich aber in die dargestellten Punkte einordnen.

Wählt man z. B. die mittleren Temperaturen bei einer Brandbelastung von 30 kg/m² aus, so zeigt sich ein Temperaturunterschied von fast 400° C trotz gleicher Art, Lagerung und Höhe der Brandlast.

Der Grund für diese großen Differenzen muß einmal in der Geometrie des Brandraumes (große Wandfläche gegenüber kleiner Grundfläche) und zum anderen in der Art der Belüftung gesucht werden. Dazu wurde in Bild 6-29 versucht, qualitativ die mittleren Brandraumtemperaturen gegenüber den in Tabelle 4.1 aufgeführten Ventilationsbedingungen darzustellen. Die Größe der Fensteröffnungen kann man wohl quantitativ darstellen; die Querbelüftung quantitativ zu erfassen, schien jedoch wenig sinnvoll. Der dargestellte Kurvenverlauf hat damit auch nur untergeordnete Bedeutung.

Es zeigt sich aber, daß sowohl zu wenig als auch zu viel Luft in einem Brandraum ein maximales Brandgeschehen verhindert.

Eine genaue Betrachtung zeigt aber auch, daß die Meßpunkte 1-1, 8-1' und 6-1' trotz gleichgroßer Grundfläche und Ventilationsöffnungen (gleiche Räume) immer noch eine Differenz von fast 100° C in den mittleren Brandraumtemperaturen zeigen. Bei den maximalen Brandraumtemperaturen verringert sich diese Differenz auf weniger als 30° C (Bild 6-28a).

Die gestrichelten Geraden in Bild 6-28a sollen den soeben geschilderten Sachverhalt qualitativ aufzeigen. Die untere Gerade verbindet die Meßpunkte, die einer Querbelüftung zugeordnet werden können, die höher liegende Gerade zeigt die Abhängigkeit zwischen der Brandbelastung und der maximalen Brandraumtemperatur, wenn die Ventilationsöffnung „richtig“ gewählt wurde, um ein extrem ungünstiges Brandgeschehen zu ermöglichen.

6.2. Brandentwicklung und Brandausbreitung vor der Fassade

6.2.1. Allgemeines

Die Versuche von Metz [4] haben gezeigt, daß zwischen dem Geschehen im Brandraum und der Temperatur-Zeit-Entwicklung vor der Fassade ein unmittelbarer Zusammenhang besteht. Es konnte festgestellt werden, daß die Temperaturen der aufsteigenden Heißgase mit zunehmender Höhe über der Brandraumöffnung rasch abnehmen. Andererseits zeigten die Versuche von Boreham Wood [6], daß bei Windeinwirkungen und einem Brandraum mit mehreren Belüftungsöffnungen dieser Zusammenhang recht kompliziert sein kann. Der Wind kann infolge des Druckgefälles im

Bereich eines angeströmten Gebäudes bewirken, daß aus leeseitigen Brandraumöffnungen vermehrt Heißgase ausströmen und sich somit längere Flammen einstellen, als dies ohne Windeinfluß der Fall wäre.

Bei den Versuchen von Metz wurden die Temperaturen nur in der Mittelebene der Brandraumöffnung und in der Nähe der Frontwand gemessen. Deshalb konnten den bislang vorliegenden Meßergebnissen keine Werte für die Ausdehnung des Heißgasstromes vor der Fassade entnommen werden. Der Wärmeinhalt der ausströmenden Heißgase und das Vermögen, Bauteile aufzuheizen, die sich in oder neben dem Heißgasstrom befinden, kann erst dann ermittelt werden, wenn außer den geometrischen und thermischen

Daten auch noch die Strömungsgeschwindigkeiten festliegen.

6.2.2. Temperaturentwicklung und Temperaturverteilung vor der Fassade

Die Thermoelemente des Meßturmes wurden im allgemeinen jede Minute abgefragt. Dies ergibt die in Bild 6-30 für einige Meßstellen dargestellten Punktfolgen. Zur übersichtlichen Darstellung der Meßergebnisse wurden jedoch zwischen die Originalmeßwerte „Ausgleichskurven“ gelegt. Diese Darstellung als Temperatur-Zeit-Kurven hat sich bisher bewährt und soll deshalb in diesem Bericht bevorzugt verwendet werden.

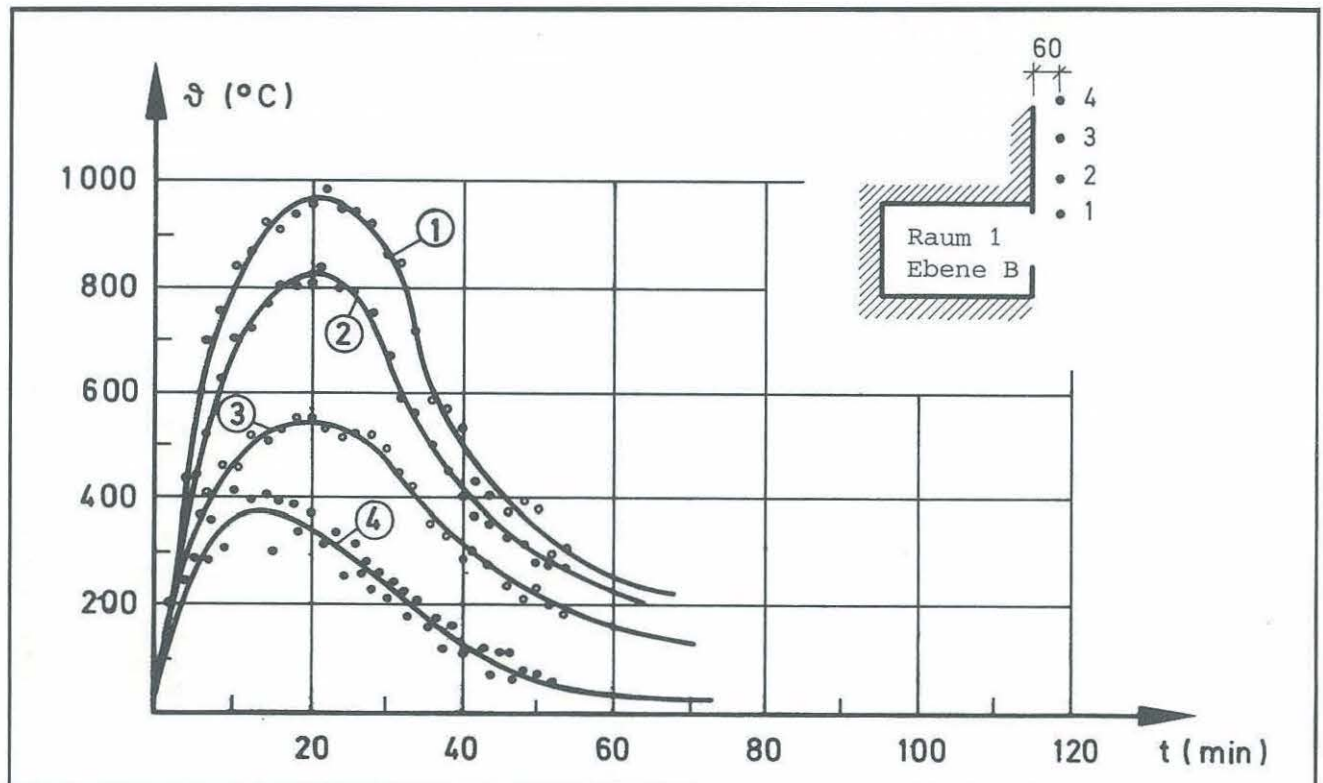


Bild 6-30: Originalmeßwerte und Ausgleichskurven der Meßstellen 1, 2, 3 und 4 vor der Fassade (Versuch 1)

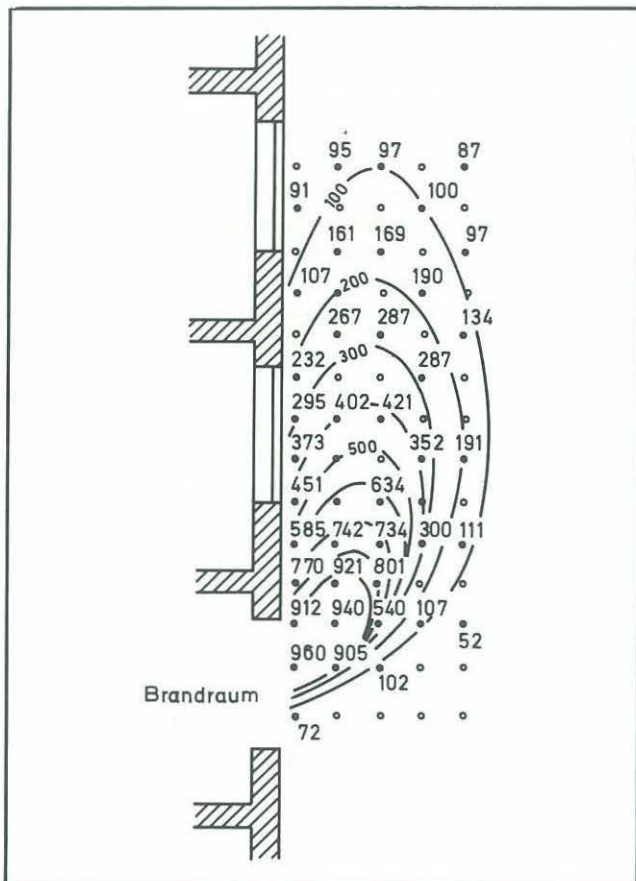


Bild 6-31: Originalmeßwerte und Isothermen zum Zeitpunkt der maximalen Temperaturen ($t = 23'$, Versuch 1)

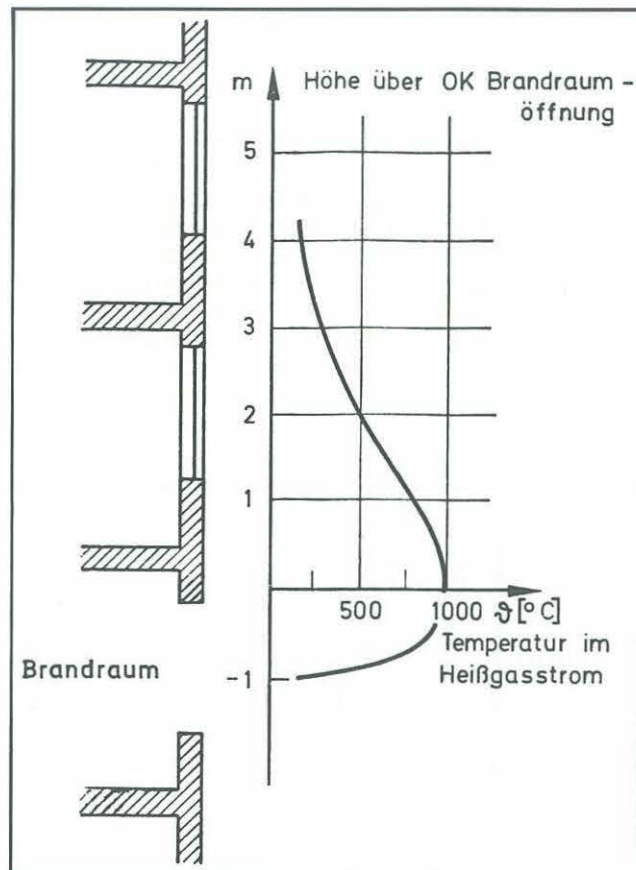


Bild 6-32: Temperaturverlauf längs der Achse des Heißgasstromes zum Zeitpunkt der maximalen Temperaturen

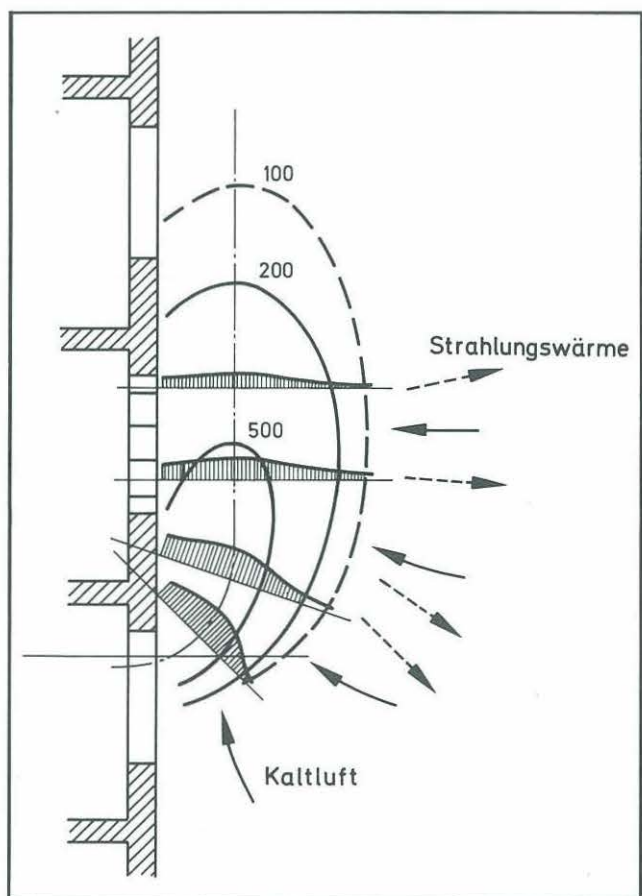


Bild 6-33: Temperaturverlauf rechtwinklig zur Achse des Heißgasstromes (Schnitt in Fenstermitte)

Sehr anschaulich, wenn auch für die weitere Verwendung der Meßergebnisse nicht so gut geeignet, ist die Isothermendarstellung des Temperaturfeldes. In einigen besonderen Fällen wird diese Darstellung jedoch gewählt. Bild 6-31 zeigt die Originalmeßwerte und die danach gezeichneten Isothermen. Es muß hierzu bemerkt werden, daß es sich bei dieser Darstellung nicht um eine „Momentaufnahme“ handelt, sondern um einen Abfragezeitraum von 20 Sekunden. Dies hat zur Folge, daß wegen Turbulenzen und Windeinwirkungen evtl. kurzzeitige Änderungen im Temperaturfeld während des Abfragezeitraumes zu einer „Verzerrung“ der Ergebnisse führen können. Die im folgenden dargestellten Isothermen sind deshalb Mittelwerte aus mehreren 20 sec dauernden Abfragezyklen.

Wie Bild 6-31 erkennen läßt, hat das Temperaturfeld eine Achse. Sie verläuft oberhalb der Brandraumdecke nahezu senkrecht, in der Nähe der Brandraumöffnung ist sie gekrümmt. Trägt man den Temperaturverlauf auf dieser Achse über die Gebäudehöhe auf, so wird die verhältnismäßig rasche Temperaturabnahme im Heißgasstrom mit zunehmendem Abstand von der Brandraumöffnung offenkundig (Bild 6-32).

Diese Temperaturabnahme resultiert in erster Linie aus der Vermischung der Heißgase mit der kalten Umgebungsluft. Die aufsteigenden Heißgase saugen Kaltluft aus der Umgebung an, diese dringt etwa rechtwinklig zur Begrenzungsfläche in den Heißgasstrom ein. Die Vermischung mit der Umgebungsluft und somit die Abkühlung erfolgt zuerst in den Randzonen und später dann im Zentrum. Deshalb verläuft die Temperatur in einer Schnittebene rechtwinklig zur Stromachse zum freien Rand des Stromes hin wie eine Gaußsche Fehlerkurve (Bild 6-33). Der Wert der Heißgas-

temperatur im Bereich der Frontwand schwankt zwischen 70 und 90 % der Maximaltemperatur im selben Schnitt. Der Wert von 70 % tritt, wie die Versuchsergebnisse gezeigt haben, in der Anfangsphase auf, solange die Frontwand noch nicht aufgeheizt ist. Der hohe Wert von 90 % wird bei einem langdauernden Brand erreicht, wenn die Frontwand Temperaturen $> 500^\circ \text{C}$ aufweist. Die räumliche Temperaturverteilung in einem Schnitt durch den Heißgasstrom ergibt sich somit, wie in Bild 6–34 dargestellt.

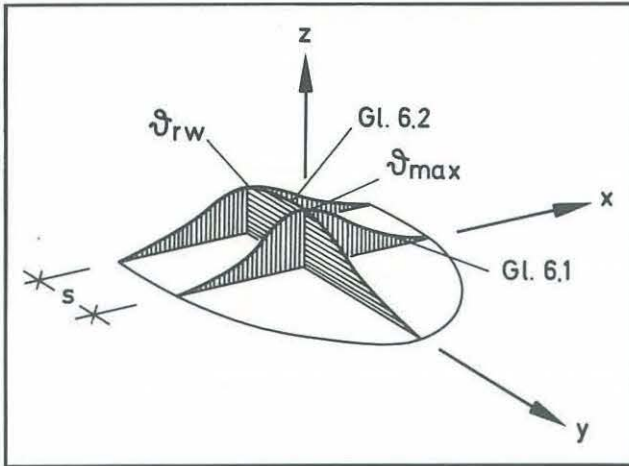


Bild 6–34: Temperaturverlauf im Heißgasstrom in einem waagerechten Schnitt

Führt man ein Koordinatensystem ein, so kann man die Temperaturverteilung mathematisch formulieren, sofern die Zentral- und die Randtemperatur sowie außerdem die Ausdehnung des Temperaturfeldes bekannt sind. Parallel zur Frontwand gehorcht die Temperaturverteilung dem Gesetz.

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \cdot e^{-ax^2} \quad (6.1)$$

Dieselbe Gesetzmäßigkeit gilt auch rechtwinklig zur Frontwand im wandfernen Bereich. Im wandnahen Gebiet gilt

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \cdot e^{-by^2} + \vartheta_{rw_1} \left(1 - \frac{s+y}{s}\right)^2 \left(1 + 2 \frac{s+y}{s}\right) \quad (6.2)$$

$$\vartheta_{rw_1} = \vartheta_{rw} - \vartheta_{rw_2} \quad (6.3)$$

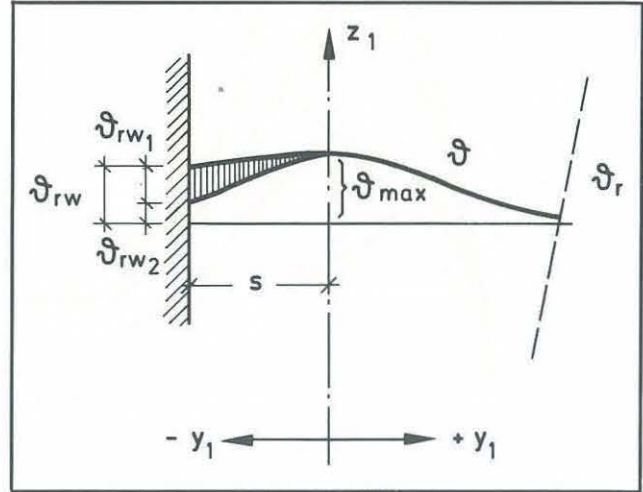


Bild 6–35: Graphische Darstellung der Gleichung

Die Herleitung dieser Formel kann [30] entnommen werden. Als Beispiel für einen konkreten Fall der Temperaturentwicklung und Temperaturverteilung vor der Fassade soll nun der Versuch 1 dienen. Dieser Versuch konnte ohne nennenswerte Windeinflüsse durchgeführt werden.

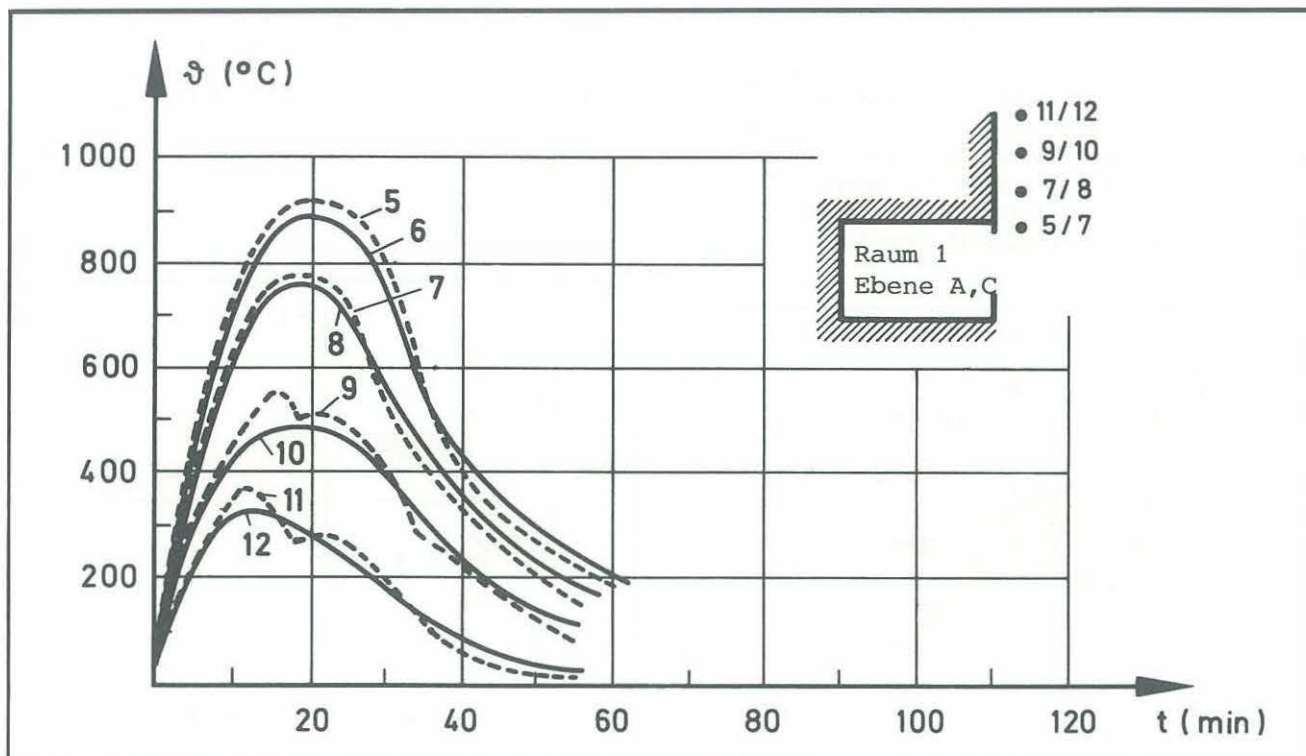


Bild 6-36: Temperaturzeitverlauf, gemessen an verschiedenen Meßstellen der Ebene A und der Ebene C (Versuch 1)

Bild 6-36 läßt, indem man den Verlauf der Temperaturen an Meßstellen in gleicher Höhe der Ebene C und der Ebene A vergleicht, die Genauigkeit der Messungen ohne Windeinfluß erkennen. Dieser liegt in der Größenordnung von $\pm 20^{\circ}\text{C}$ in der Nähe der Brandraumöffnung und bei $\pm 40^{\circ}\text{C}$ in den weiter entfernten Bereichen.

Die Isothermenbildfolge (Bild 6-37) läßt den Einfluß der Aufheizung der Frontwand erkennen. Während zu Brandbeginn die Linien gleicher Temperatur in der Nähe der Frontwand steil anstiegen, verliefen diese zum Brandende hin

dort etwa waagrecht, d. h. die Temperaturen waren zwischen der Frontwand und dem Zentrum des Temperaturfeldes nahezu konstant.

Als wesentliches Ergebnis kann folgendes festgestellt werden: Der Bereich, in dem Temperaturen $\theta > 500^{\circ}\text{C}$ auftreten, erstreckt sich bis etwa zur Mitte des Fensters des über dem Brandraum liegenden Zimmers. Absolut ausgedrückt: Die Flammenspitzen (der Umriß der Flammen) entsprechen, wie alle Meßergebnisse gezeigt haben, etwa dem Verlauf der 500°C -Isotherme und erreichen zum Zeitpunkt der Maximaltemperaturen im Brandraum eine

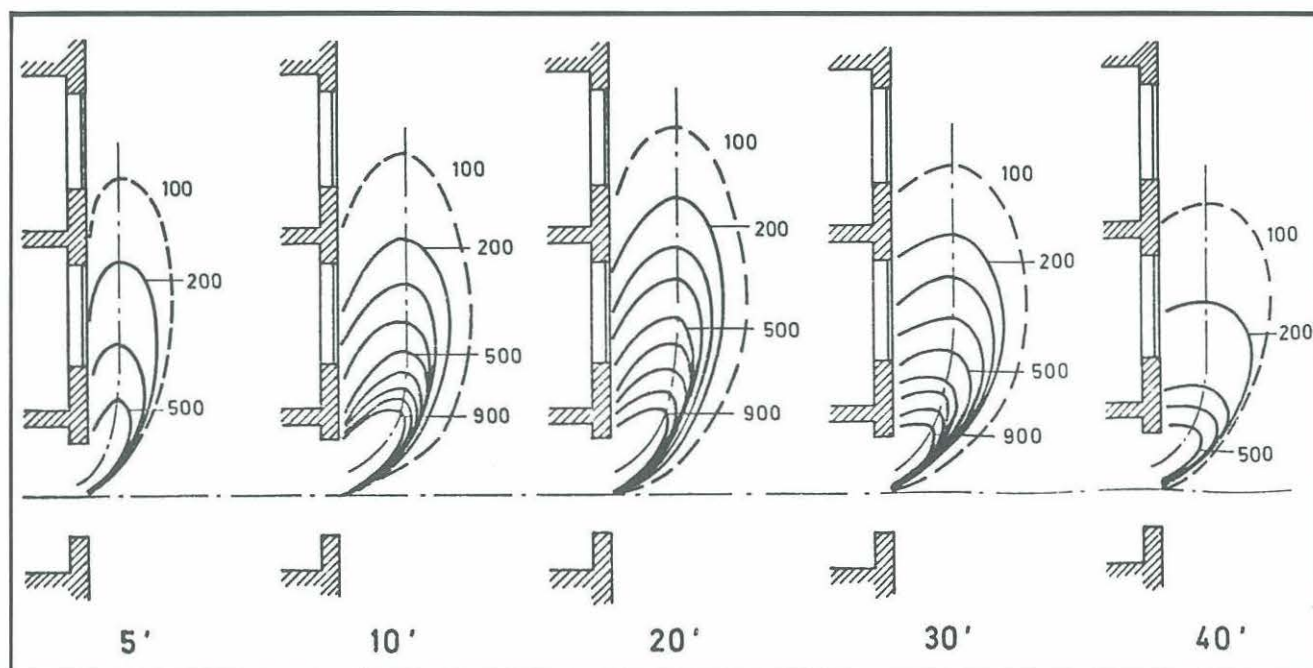


Bild 6-37: Isothermen des Temperaturfeldes vor der Fassade (Versuch 1)

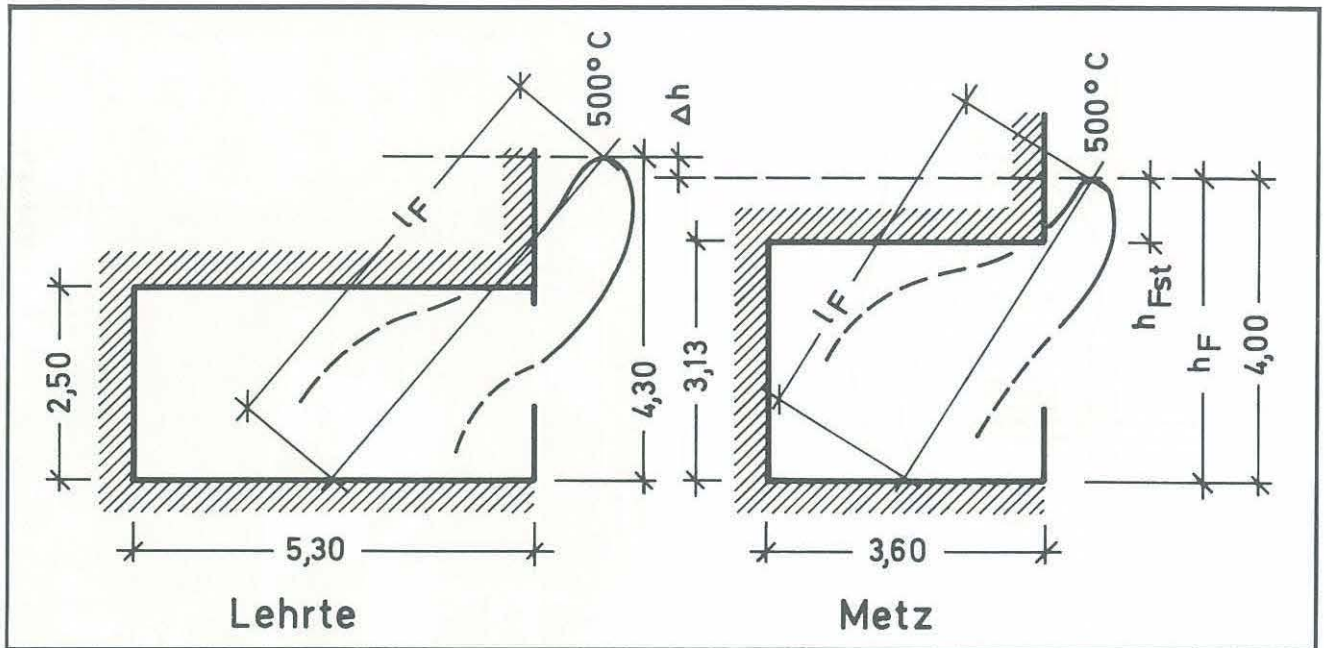


Bild 6-38: Vergleich der Flammenhöhen (etwa Höhe der 500° C-Isotherme), die sich bei den Versuchen von Lehrte und Metz einstellen

Höhe von 4,0 m bis 4,3 m über dem Brandraumboden. Genauer läßt sich die Flammenhöhe nicht eingrenzen, da die Flammenspitzen infolge turbulenter Vermischung des Heißgases mit der Umgebungsluft sich ständig bewegen.

Vergleicht man dieses Ergebnis, das bei einem Brand in einem 2,50 m hohen Raum gefunden wurde, mit den Ergebnissen der Versuche von Metz, bei denen das Brandhaus 3,13 m hoch war, so kann man eine befriedigende Übereinstimmung in der Flammenhöhe, gemessen vom Brandraumboden, feststellen. Lediglich die Höhe der Flammenspitze über dem Fenstersturz h_{Fst} war bei beiden Versuchen sehr unterschiedlich. Während diese bei den Lehrter Versuchen ca. $h_{Fst} = 1,50 - 1,80$ m betragen hat, war diese im Falle des Metzger Versuchsstandes $h_{Fst} = 1,00$ m. Definiert man als Gesamtlänge der Flammen den Abstand zwischen Mitte Brandraumboden und Flammenspitze, so schlugen aus der Öffnung des 5,30 m tiefen Brandraumes des Lehrter Hauses Flammen der Länge $l_F \approx 5,30$ m heraus, im Falle Metz war l_F ungefähr 4,70 – 5,00 m.

Kragen horizontale Platten über der Brandraumöffnung aus der Frontwand aus, so verlagert sich das Zentrum des Temperaturfeldes vor die Außenkante der Kragplatten.

Wie die Temperaturmeßergebnisse und die Beobachtungen der leuchtenden Flammen zeigten, ändert sich dabei die Höhe der 500° C-Isotherme über dem Brandraumboden innerhalb der Genauigkeit der Meß- und Beobachtungsmöglichkeiten nur unwesentlich ($\Delta h_F < 30$ cm). Dies hat seinen Grund wahrscheinlich darin, daß die Heißgase längs ihres etwa horizontalen Weges unter der Kragplatte nur wenig Luft ansaugen können und sich deshalb nur geringfügig abkühlen. Näheres hierzu wird in Kapitel 6.3.1 abgehandelt und in [30] eingehend begründet.

Die Achse des Temperaturfeldes zeigt im Bereich zwischen den Kragplatten eine leichte Krümmung, wenn am Plattenrand ein Brüstungselement steht. Ist der Plattenrand frei, so ist die Krümmung der Achse stärker. Als wesentliches Ergebnis sollte jedoch die Tatsache gewertet werden, daß

der gesamte frontwandnahe Bereich von Luft bzw. Heiß- oder Rauchgasen mit einer Temperatur $\vartheta < 200^\circ$ C erfüllt ist.

Dies ist natürlich nicht so, wenn auf der Kragplatte zusätzliche Brandlast lagert. In diesem Fall ist der gesamte Bereich zwischen der Frontwand und den übereinander liegenden Kragplatten von Heißgasen der Temperatur $\vartheta > 500^\circ$ C erfüllt. Die 200° C-Isotherme verlagert sich dann weiter vom Gebäude weg und hat einen höher liegenden Hochpunkt im Vergleich zum Fall ohne zusätzliche Brandlast auf einer Kragplatte. Eine Achse des Temperaturfeldes, definiert als Verbindungslinie der Hochpunkte der Isothermen, läßt sich für diesen Fall nicht mehr angeben. Die in den Bildern 6-39

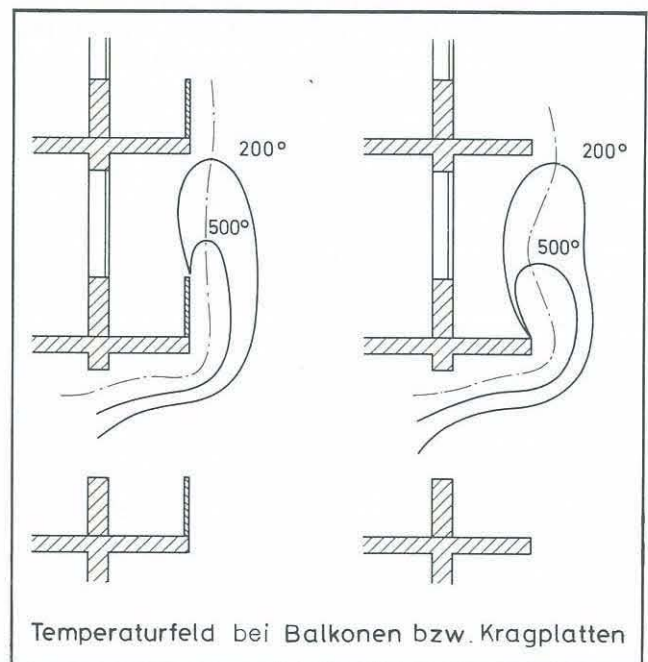


Bild 6-39: Isothermen des Temperaturfeldes vor der Fassade

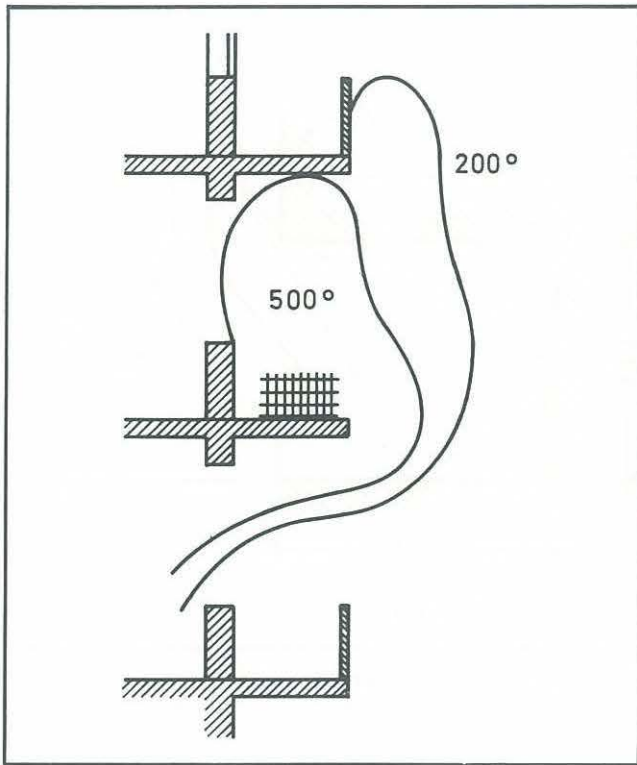


Bild 6-40: Isothermen des Temperaturfeldes, wenn auf dem Balkon Brandlast lagert

und 6-40 gezeigten Isothermen wurden jeweils zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums im Brandraum festgestellt.

Zwischen der Brandraumöffnung und der darüber auskragenden Platte wurde das Temperaturfeld, wie in Bild 6-42 dargestellt, ermittelt. Etwa ab der Mitte der Kragplatte läßt es sich in guter Näherung mathematisch durch eine Gauß'sche Fehlerkurve darstellen.

An der Nordseite des Gebäudes konnte mehrfach beobachtet werden, daß Heißgasströme, die aus nebeneinanderliegenden Fenstern herausströmten, in den oberen Bereichen ein gemeinsames Zentrum besaßen (Bild 6-44). Mit Hilfe der Wanderthermoelemente konnte festgestellt werden, daß sich die 200° C-Isothermen etwa in Höhe der Flammenspitzen – also den Hochpunkten der 500° C-Isothermen – schnitten. Der gemeinsame Hochpunkt der 200° C-Isothermen der Doppelstromflamme lag etwa 2 m höher als im Fall der Einzelstromflamme. Eine Zunahme der Höhe des Hochpunktes der 500° C-Isotherme über dem Brandraumboden konnte jedoch nicht beobachtet werden.



Bild 6-41: Zu Bild 6-40 gehörendes Flammenbild (Versuch 6)

Dies hat folgenden Grund: Bis zur Höhe des Verschmelzungspunktes kann jeder Einzelstrom für sich Kaltluft aus der Umgebung ansaugen. Sobald sich jedoch eine gemeinsame Begrenzung des Doppelstromes ausgebildet hat, deren Fläche kleiner ist als die Summe der Begrenzungsflächen der Einzelströme, kühlen sich die Heißgase längs ihres Weges langsamer ab als im Falle von Einzelflammen. Es ist hierbei jedoch zu bedenken, daß durch die geringere Luftzufuhr zur Doppelstromflamme nicht nur deren Temperaturfeld länger wird, sondern auch deren Gehalt an strahlenden Bestandteilen (H_2O , CO_2 , CO) längs des Weges nicht so schnell abnimmt, was sich wiederum auf die Intensität der Wärmestrahlung und somit auf das Maß der Beanspruchung von Außenbauteilen negativ auswirkt (näheres hierzu Kap. 6.3.1 und [30]).

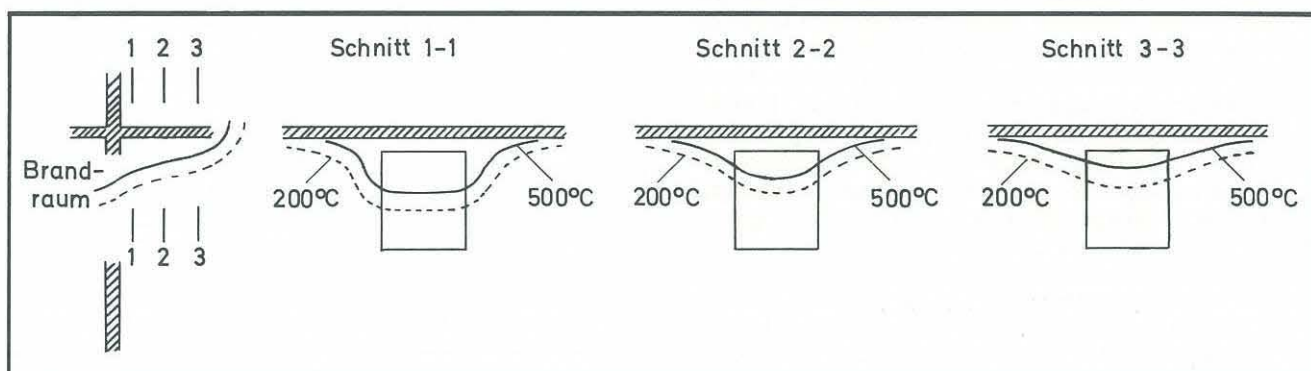


Bild 6-42: Temperaturverteilung unter den Balkonplatten

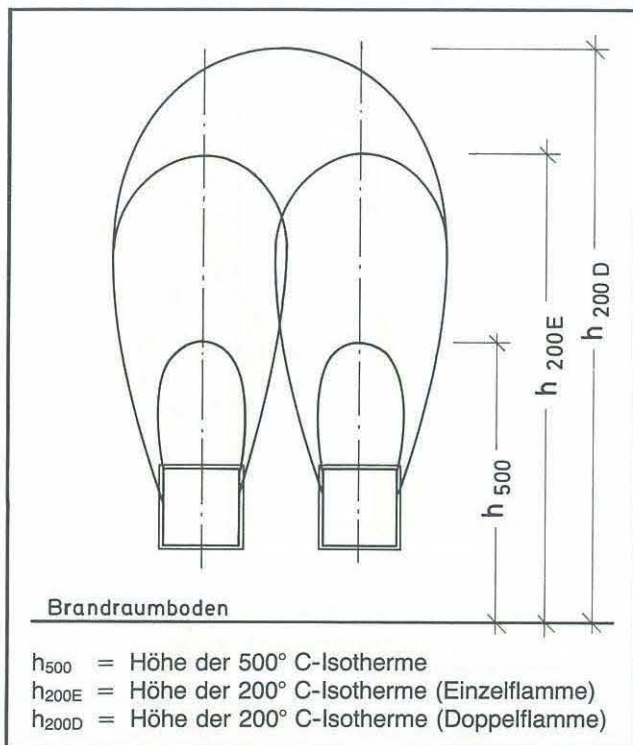


Bild 6–43: Verschmelzung der Heißgasströme, die nebeneinanderliegende Brandraumöffnungen verlassen



Bild 6–44: Zugehörendes Flammenbild

6.2.3. Geschwindigkeit und Richtung der Heißgase vor der Fassade

Auf die Ermittlung der Heißgasgeschwindigkeit wurde deshalb so großer Wert gelegt, weil sie neben der Temperatur die maßgebliche Kenngröße für den konvektiven Wärmeübergang ist. Nur anhand der Kenntnis ihrer Werte können die Temperaturmessungen an Außenbauteilen detailliert ausgewertet werden. Zum anderen transportieren die Heißgase große Wärmemengen aus dem Brandraum ins Freie. Eine Berechnung des Heißgasmassen- oder -volumenstromes, der eine Brandraumöffnung verläßt, kann nur erfolgen, wenn Klarheit über die auftretenden Geschwindigkeiten herrscht. Nur so kann eine Wärmebilanz für einen Brand aufgestellt werden.

Die Heißgase strömen aus der Brandraumöffnung aus und werden infolge des auf sie einwirkenden Auftriebes vor der Frontwand in eine vertikale Bahn geleitet. Wiederum am Beispiel des Versuches 01 soll nachfolgend gezeigt werden, wie die Heißgasströmung vom Geschehen im Brandraum abhängt.

Im Brandraum steigen die Heißgase zunächst senkrecht auf, streichen dann unter der Decke entlang und formieren sich im vorderen Drittel des Brandraumes zu dem Heißgasstrom, der die Brandraumöffnung verläßt. Etwa die oberen Zweidrittel der Brandraumöffnung sind von Heißgasen erfüllt, durch das untere Drittel strömt Frischluft ein, sofern der Brandraum nur eine Öffnung nach außen hat.

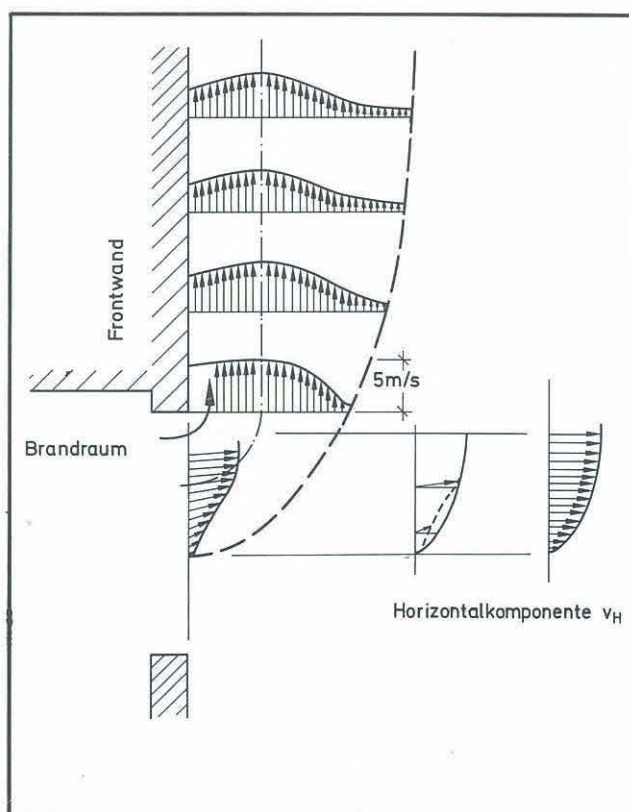


Bild 6–45: Verteilung der Heißgasgeschwindigkeit vor der Fassade

Im Bereich des Fenstersturzes strömten im Versuch 1 die Heißgase horizontal, im oberen Drittelspunkt der Brandraumöffnung etwa unter einem Winkel von 45 ° und weiter unten noch steiler (Bild 6–45) durch die Austrittsöffnung in der Frontwand. Da der Auftrieb schon innerhalb des Brand-

raumes den Weg der Rauchgase bestimmt, durchlief die Strömungsachse in diesem Fall die Fensterebene geneigt. Die Verbindungslinie der Endpunkte der Vertikalprojektion der Geschwindigkeitsvektoren ergibt etwa eine quadratische Parabel (Bild 6-45). Nach Umlenkung in die Vertikale ist der Verlauf der Geschwindigkeit in einem horizontalen Schnitt zu dem Verlauf der Temperaturen ähnlich. Es fällt jedoch auf, daß die Temperatur der aufsteigenden Heißgase längs der Achse des Temperaturfeldes rasch abfällt, während die Geschwindigkeit im Zentrum des Heißgasstromes sich nicht merklich verringert. Der Grund hierfür ist, daß jedes Heißgasteilchen, das wärmer ist als seine Umgebung, Auftrieb erleidet. Die Größe der Auftriebskraft, die auf ein Volumenelement wirkt, ist eine Funktion der Temperaturdifferenz zum nebenliegenden Teilchen. Demzufolge wirken auch auf die bereits absolut gesehen stark abgekühlten Gase in den höheren Zonen noch Auftriebskräfte, da auch dort immer noch Temperaturdifferenzen in der Größenordnung $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ vorhanden sind.

Der Verlauf der Aufwärtsgeschwindigkeit der Heißgase in Abhängigkeit von der Höhe und der Ausströmtemperatur läßt sich nach [30] näherungsweise wie folgt darstellen:

$$w_H = \sqrt{\frac{\vartheta_G + \vartheta_{G0}}{120}} \quad (6.4)$$

Es bedeuten:

$\vartheta_G [^\circ\text{C}]$ die Heißgastemperatur im betrachteten Höhen-schnitt

$\vartheta_{G0} [^\circ\text{C}]$ die Heißgastemperatur im Bereich der Brandraum-öffnung

Diese Näherungsgleichung gilt für den Bereich $600^\circ\text{C} < \vartheta < 1200^\circ\text{C}$.

Die mittlere horizontale Ausströmgeschwindigkeit errechnet sich nach Bernoulli zu

$$v_{am} = \frac{2}{3} \varphi_a \cdot \sqrt{2g h'' \left(\frac{\rho_K}{\rho_{Br}} - 1 \right)} \quad (6.5)$$

Die Bezeichnungen sind

φ ein Verlustfaktor

$g [\text{m/sec}^2]$ die Erdbeschleunigung

$h'' [\text{m}]$ die Höhe des Teiles der Brandraumöffnung, der von den ausströmenden Gasen eingenommen wird

$\rho [\text{kg/m}^3]$ die Dichte der Rauchgase bzw. der Umgebungsluft

$\vartheta [^\circ\text{C}]$ die Temperatur der Rauchgase bzw. der Luft

Die Indizes können Bild 6-46 entnommen werden.

Die Ergebnisse der Versuche, bei denen der Brandraum nur eine Öffnung hatte, zeigten, daß der Verlustfaktor $\varphi = 0,7$ ist, sofern die Brandraumtemperaturen im Bereich $600^\circ\text{C} < \vartheta < 1000^\circ\text{C}$ liegen. Zur numerischen Berechnung der Rauchgasgeschwindigkeit benötigt man noch den Zusammenhang

$$\frac{h_F''}{h_F'} = \left[\frac{\rho_K}{\rho_{Br}} \left(1 + \frac{1}{\lambda \cdot \alpha} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$h_F = h_F' + h_F'' \quad (6.6)$$

wobei nach Gumz [31] für ein Feuer mit vorwiegend zellulosehaltiger Brandlast

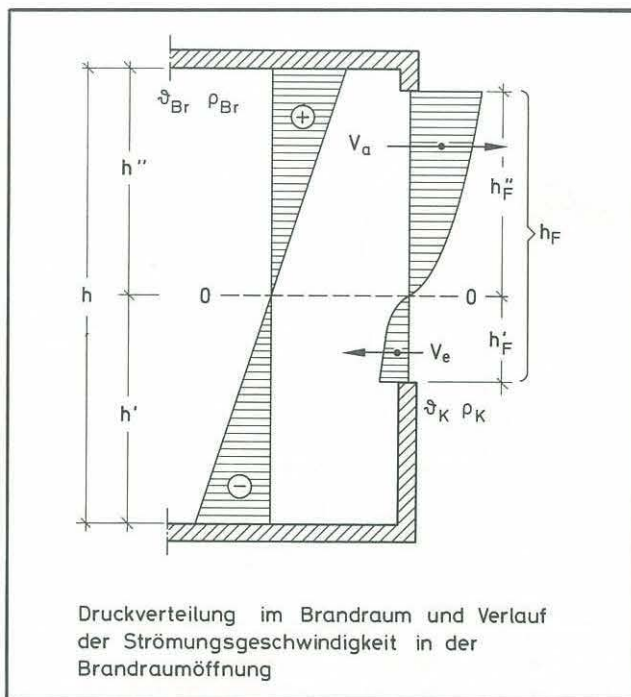


Bild 6-46: Rechnerische Verteilung von Druck und Geschwindigkeit

$$\alpha = 0,126 + 1,289 \cdot \frac{H_u}{1000} \quad (6.7)$$

ist. Die Herleitung der Gleichungen (6.5) und (6.6) ist in [30] gezeigt.

Wertet man diese Zusammenhänge unter Verwendung der während der Versuche gewonnenen Temperaturmeßergebnisse numerisch aus, so sieht man, daß die Nulllinie der Geschwindigkeit nur geringfügig um den unteren Drittelspunkt schwankt, wenn sich die Brandraumtemperatur innerhalb der vorerwähnten Grenzen bewegt. Bild 6-49 läßt erkennen, daß etwas mehr als die obere Hälfte der Brandraumöffnung von leuchtenden Flammen (Heißgase) mit einer Temperatur $\vartheta_G > 500^\circ\text{C}$ ausgefüllt ist. Die nicht leuchtenden Rauchgase mit Temperaturen $\vartheta_G < 500^\circ\text{C}$, die noch unterhalb der leuchtenden Flammen ausströmen, konnten natürlich fotografisch nicht erfaßt werden. Ihre Geschwindigkeit wurde nur mit dem Flügelradanemometer festgestellt.

Ursache für die Horizontalkomponente der Heißgasströme ist der Überdruck, der sich infolge von Dichteunterschieden zwischen den Rauchgasen im Brandraum und der Kaltluft der Umgebung des Gebäudes einstellt. Der Überdruck im Brandraum berechnet sich zu

$$\Delta P'' = g \cdot h'' (\rho_K - \rho_{Br}) \quad (6.9)$$

(Bezeichnungen siehe Bild 6-46)

Die numerische Auswertung dieser Gleichung (Bild 6-47) zeigt, daß der brandbedingte Überdruck den Wert von $\Delta P'' = 1,1 \text{ mm WS}$ bei der vorgegebenen Brandraumhöhe nicht übersteigen kann. Der während einiger Versuche aufgetretene Überdruck von bis zu 4 mm WS ist demnach durch Windeinflüsse hervorgerufen worden.

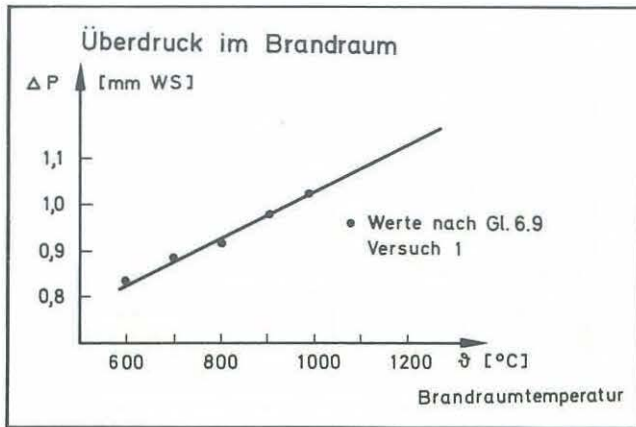


Bild 6-47: Brandbedingter Überdruck im Brandraum in Höhe der Decke

6.2.4. Die Geometrie des Temperatur- und Strömungsfeldes vor der Fassade

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, hat das Strömungs- und Temperaturfeld vor der Fassade ein klar erkennbares Zentrum. Der Übergang vom Heißgasstrom zur kalten Umgebung läßt sich jedoch anhand der Meßergebnisse nur schwer festlegen. Dies hat zwei Gründe:

1. Ein Thermoelement, das sich in der Nähe des Heißgasstromes aber noch in der Kaltluft befindet, wird, wenn es nicht abgeschirmt ist, von der aus dem Zentrum des Heißgasstromes emittierten Strahlungswärme getroffen. So zeigten z.B. alle Elemente des Meßturmes, die nicht von Heißgas umströmt waren, während der Versuche geringfügige Temperaturerhöhungen an. Je näher das betrachtete Thermoelement am Rand des Heißgasstromes lag, desto größer war diese „Fehlmesung“. Aus diesem Grunde ist auch die 100 °C-Isotherme in allen Bildern dieses Berichts gestrichelt eingezeichnet.
2. Das Ansaugen von Kaltluft und das turbulente Mischen mit den Rauchgasen ist ein pulsierender Vorgang, d.h. die Begrenzung der Heißgasströmung ist in ständiger Bewegung. Als Begrenzungslinie läßt sich also nur ein Mittelwert aus einer Vielzahl von Messungen festlegen. Der Verlauf dieses Mittelwertes ist in Bild 6-48 als Feldbegrenzungskurve dargestellt.

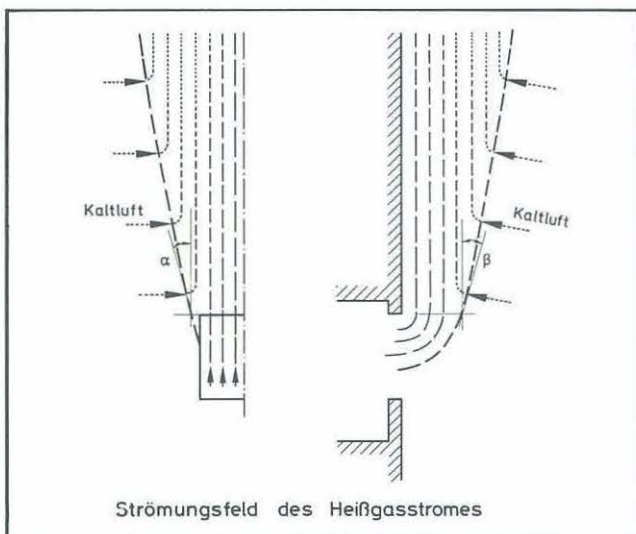


Bild 6-48: Strömungsfeld des Heißgasstromes

Die Ausbreitwinkel des Heißgasstromes, α rechtwinklig und β parallel zur Frontwand, sind, wie Vergleiche mit weiteren Versuchsergebnissen [5,32] gezeigt haben, Funktionen der Fenstergröße und Geometrie des Brandraumes und der Heißgastemperatur.

Die Auswertung aller während der Lehrter Versuche gewonnenen Ergebnisse zeigt, daß folgende Näherungsgleichungen gelten:

$$\alpha = k_1 \frac{2200 + \vartheta_{G0}}{\vartheta_{G0}} \quad (6.10)$$

$$\beta = k_2 \frac{2200 + \vartheta_{G0}}{\vartheta_{G0}} \quad (6.11)$$

Für etwa quadratische Fensteröffnungen gilt

$$k_1 = 3,0 \\ k_2 = 3,0$$

Für Fensteröffnungen mit einem Seitenverhältnis von $b_F/h_F = 1,4$ (Fensteröffnungen in der Hausnordseite, Raum 4) konnten folgende Werte ermittelt werden:

$$k_1 = 2,6 \\ k_2 = 2,8$$

Der Abstand der Achse des Heißgasstromes ist entsprechend den Versuchsergebnissen näherungsweise proportional zur mittleren Ausströmgeschwindigkeit v_m [m/sec]. Es gilt

$$s = 1,5 \frac{v_m}{g} \quad (6.12)$$

wobei g [m/sec²] die Erdbeschleunigung ist. Die Gültigkeit der Gleichung setzt Heißgastemperaturen $\vartheta_G > 600$ °C voraus. Zu Brandbeginn, als die Temperaturen der ausströmenden Gase $\vartheta_G < 600$ °C waren, legten sich die Flammen nach dem Verlassen der Ebene der Fensteröffnung an der Hauswand an. Ein Temperatur- und Strömungsfeld, wie es vorher beschrieben wurde, bildete sich bei allen Versuchen erst einige Minuten nach dem Zünden der Brandlast und nach erfolgtem flash-over im Brandraum aus. Während der Abkühlphase des Brandes ist die exakte Bestimmung der Kenngröße des Temperaturfeldes aus den Meßergebnissen infolge des Strahlungsaustausches zwischen der aufgeheizten Wand des Gebäudes und den Thermoelementen sehr erschwert. Ebenso lassen sich wegen Fehlens glühender Ruß- und Ascheteilchen im Heißgas während dieser Zeit die Bahnen der aufsteigenden Heißgasteilchen optisch schlecht verfolgen. Die vorher dargelegten Zusammenhänge können also nur für die Aufheizphase und den Zeitraum der Abkühlphase als gesichert gelten, solange noch leuchtende Flammen und deutlich sichtbare Rußteilchen die Brandraumöffnung verlassen.

6.2.5. Windeinflüsse

Während der Lehrter Versuche traten Windgeschwindigkeiten in der Größenordnung von $v_w = 0 - 11$ m/sec auf (siehe Diagramme in den Anlagen). Es stellte sich heraus, daß der Wind entscheidenden Einfluß auf das Brandgeschehen vor der Fassade nehmen kann.

War keine Querlüftung im Brandraum möglich, weil dieser nur eine Öffnung hatte (Versuche 01, 02, 1 und 6), so konnte der Wind keinen Einfluß auf den Ablauf des Brandes und somit die Zeit-Temperatur-Verteilung im Brandraum nehmen. Es wurden lediglich die Heißgase außerhalb des Brandraumes aus ihrer vertikalen Bahn abgelenkt. Die Lage der Nulllinie der Heißgasgeschwindigkeit blieb weitgehend erhalten (Bild 6-49).



Bild 6-49: Flammenbild des vom Wind abgelenkten Heißgasstromes

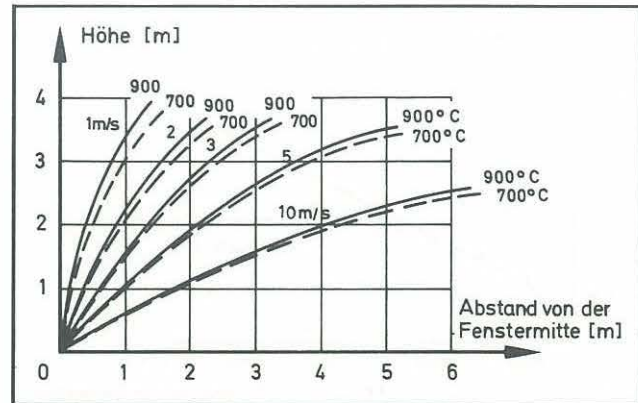


Bild 6-50: Auslenkung der Heißgasstromachse parallel zur Frontwand in Abhängigkeit von der Querwindgeschwindigkeit und der Temperatur im Brandraum

Die Auswertung der Meßergebnisse hinsichtlich des Windinflusses läßt erkennen, daß die Neigung der Bahn der Heißgase im wesentlichen von ihrer Temperatur und der Geschwindigkeit der Windkomponente parallel zur Hausfront abhängig ist. Bild 6-50 zeigt diesen Zusammenhang recht deutlich.

Bemerkenswert ist außerdem die Feststellung, daß sich während der Versuche bei Windeinfluß die Flammenlänge nicht änderte. Zwar wurde die Höhe der Flammenspitze über dem Brandraumboden h_{Fst} bzw. über dem Fenstersturz h_{Fst} infolge der Neigung der Flamme geringer, die absolute Länge der Flamme und der Temperaturverlauf längs der Flammenachse hingegen änderten sich nicht. Es konnte jedoch bemerkt werden, daß die Flammen unter Windeinfluß die Tendenz zeigten, sich zu deformieren. Während die Isothermen in einem waagerechten Schnitt durch den Heißgasstrom ohne Windeinfluß konzentrisch waren (Bild 6-51), ergab sich im abgelenkten Heißgasstrom ein unregelmäßiges Isothermenbild. Die Ausdehnung des Heißgasstromes parallel zur Wand wurde wesentlich größer als rechtwinklig zur Wand. Die in Kapitel 6.2.4 gezeigten Gesetzmäßigkeiten über die Geometrie des Heißgasstromes gelten bei Wind-

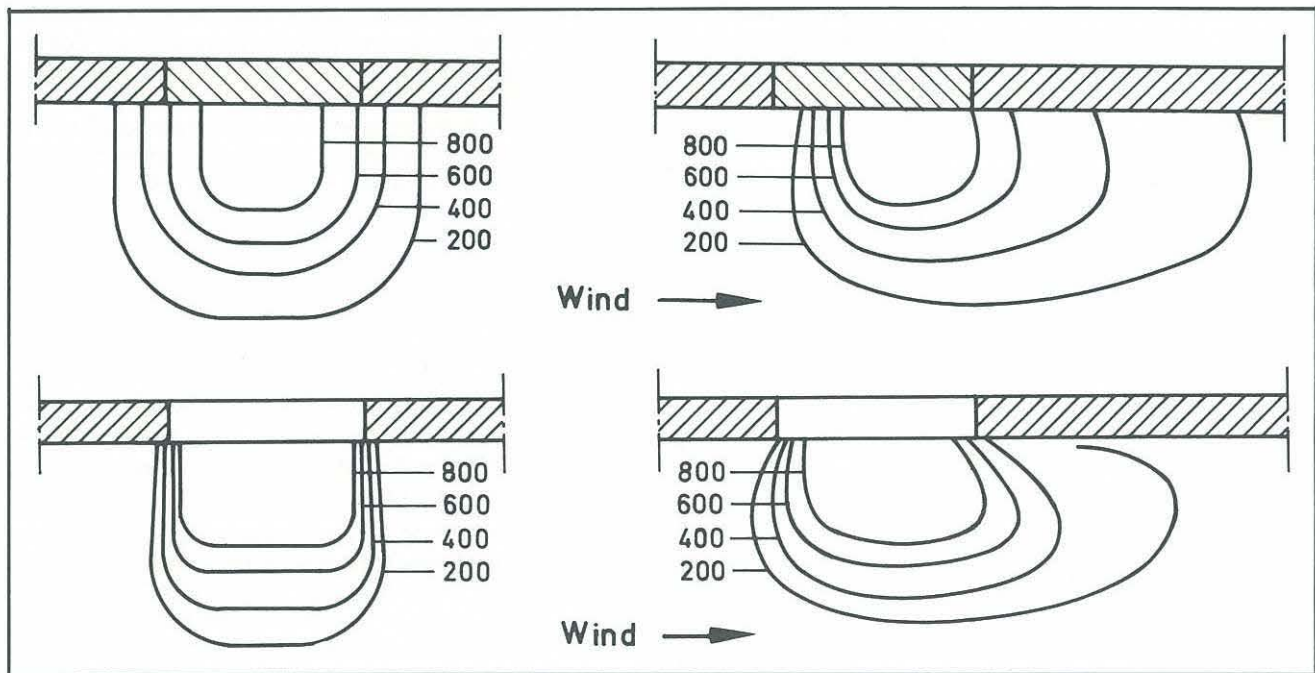


Bild 6-51: Querschnitt durch den Heißgasstrom (rechts ohne Windeinfluß, links mit Windeinfluß) in Höhe des oberen Drittelpunktes der Brandraumöffnung (unten) und 0,5 m über OK Brandraumöffnung (Versuch 6)

einfluß nicht mehr. Bei sämtlichen Versuchen, bei denen Querlüftung der Brandräume möglich war, hatte der Wind jedoch erheblichen Einfluß auf die Flammenlänge. Der auf der Luvseite des Brandraumes (bzw. Gebäudes) einströmende Wind vermehrte den auf der Leeseite ausströmenden Heißgasmassenstrom entsprechend dem windbedingten Überdruck im Brandraum. Nachrechnungen des Massenstroms der Heißgase, die den Brandraum verlassen (siehe hierzu auch Kapitel 6.2.6), zeigen, daß – unter Ansatz des Staudruckes

$$q = \frac{\gamma \cdot v_w^2}{2} \eta \quad (6.13)$$

Es bedeuten γ [kp/m³] das spezifische Gewicht der Luft
 v_w [m/sec] die Windgeschwindigkeit
 η der Formbeiwert des Gebäudes

und dem Verlustfaktor $\varphi = 0,7$ für jede vom Wind bzw. dem Heißgas durchströmte Öffnung (Fenster, Türen) – sich die Windeinwirkung auf das Brandgeschehen vor der Fassade mit für brandschutztechnische Zwecke genügender Genauigkeit rechnerisch abschätzen läßt. Die Werte von η können DIN 1055 Blatt 4 entnommen werden.

Als Beispiel für den Zuwachs der Flammenlänge seien Isothermen der Flammen, die während der Versuche mit Querlüfteinfluß aus dem Fenster des Raumes 1 herausgeschlugen, denen des Versuchs 1 (ohne Windeinfluß) in Bild 6–52 gegenübergestellt. Während ohne Windeinfluß der Hochpunkt der 500° C-Isotherme etwa 4,30 m über dem Brandraumboden lag, vergrößerte sich die Flammenlänge bei 2 m/sec luvseitiger Einströmgeschwindigkeit auf ca. 5,20 m und bei 4 m/sec Einströmgeschwindigkeit auf etwa 6,70 m. Die zur Einströmgeschwindigkeit von 2 m/sec gehörende rechtwinklig zur Fensterfläche wehende Windkomponente betrug dabei ca. $v_w = 2,8$ bis 3,0 m pro Sekunde und die zu 4 m/sec einströmende Geschwindigkeit gehörige Windgeschwindigkeit war etwa $v_w = 5,5 - 6,0$ m/sec.

Im allgemeinen weht der Wind nicht rechtwinklig auf Gebäudeflächen; d. h. zusätzlich zu der „flammenverlängernden“ Komponente tritt auch noch eine Windkomponente parallel zur Frontwand auf, welche die Flammenachse neigt. Bild 6–53 zeigt diesen allgemeinen Fall als Flammenbild, Bild 6–54 als Isothermendarstellung, die anhand der Aufzeichnungen des Meßturms und der Wanderthermoelemente entworfen wurde.

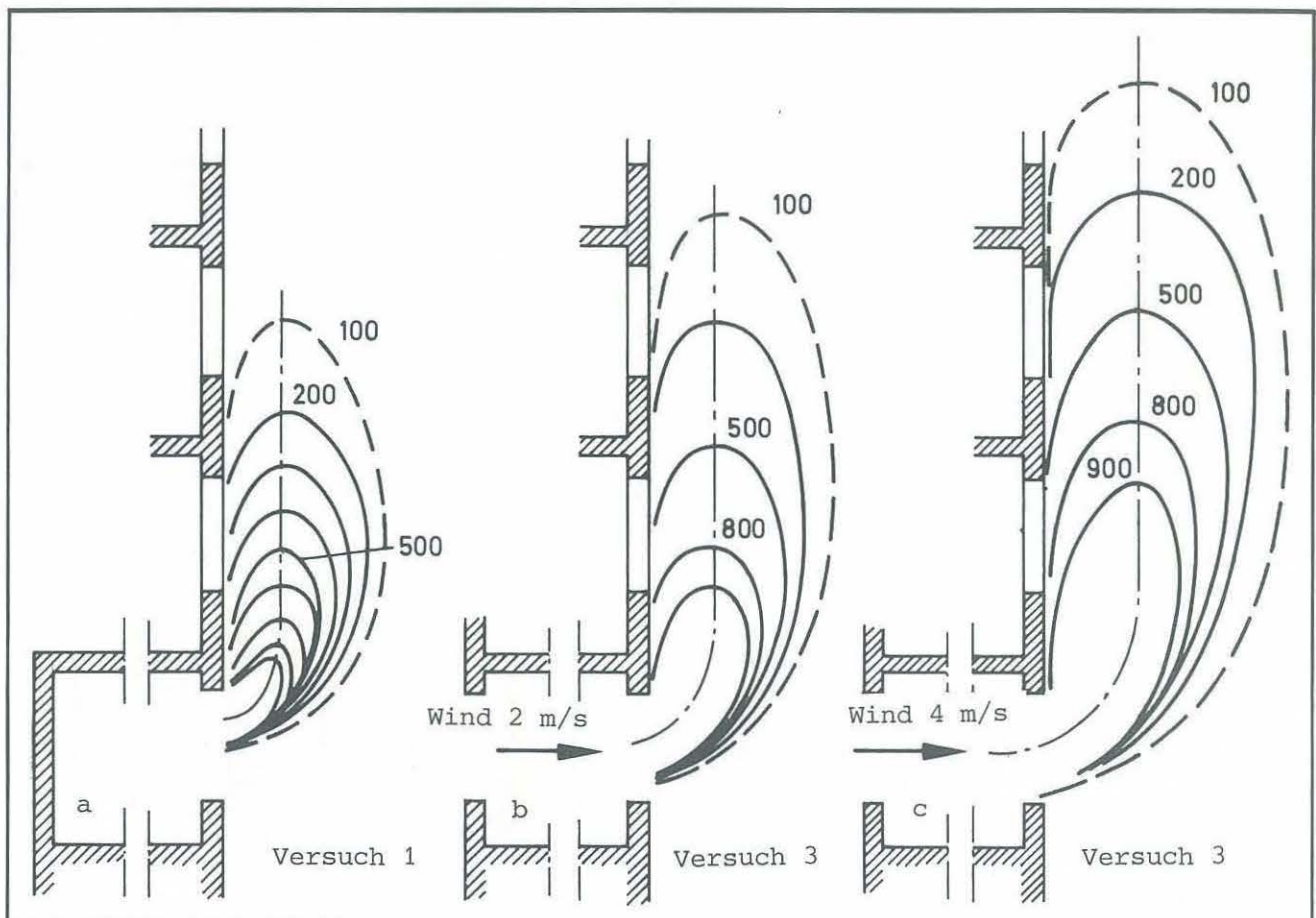


Bild 6–52: Isothermenbilder des Temperaturfeldes ohne und mit Windeinfluß

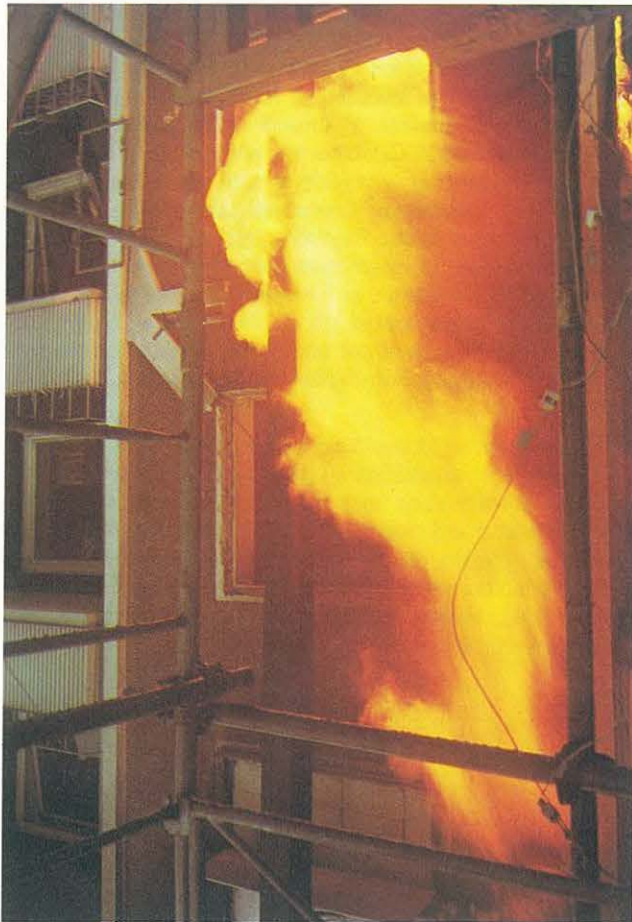


Bild 6-53: Leuchtende Flammen zu Bild 6-52 und Bild 6-54

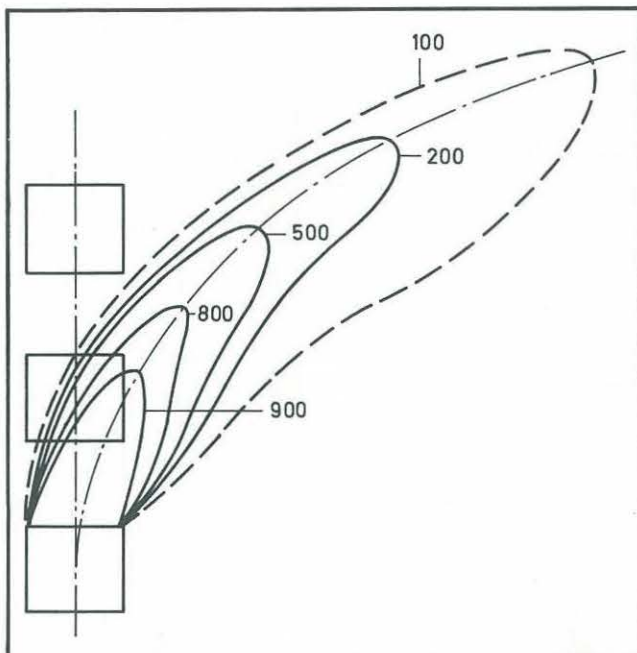


Bild 6-54: Isothermen in einem Schnitt parallel zur Wand Versuch 3, Windbedingungen wie Bild 6-52 c

Der Versuch 5 wurde bei stark böigem Wind aus wechselnden Richtungen durchgeführt. Es konnte während dieses Versuches etwa 10 Minuten lang folgende Erscheinung beobachtet werden:

Der Wind stand nahezu rechtwinklig auf der Südseite des Hauses. Die Brandlast des Raumes 1 war fast abgebrannt, im Raum 2 war der Brand voll entwickelt. Während ohne Windeinwirkung die Spitzen der aus Raum 2 herausschlagenden Flammen etwa 30 cm über der Balkonbrüstung lagen, wuchs die Flammenlänge bei Windeinwirkung auf mehr als das Doppelte ihres ursprünglichen Wertes an. Durch die an der Ecke des angeströmten Gebäudes auftretende Querwindkomponente (Bild 6-56) wurden die Flammen geneigt. Sie wurden abgetrieben und nach Erreichen der Gebäudeecke in eine Bahn längs der Giebelwand gelenkt. Die anhand der festgestellten Strömungsgeschwindigkeiten rechnerisch ermittelte Winddruckverteilung ist in Bild 6-57 gezeigt. Hieraus ist leicht einzusehen, daß infolge Druckdifferenz zwischen Fenster F_1 und Fenster F_2 Frischluft von Raum 1 über den Flur in Raum 2 einströmte und durch das Fenster F_2 in Form von Heißgas wieder ausströmte.



Bild 6-55: Während Versuch 5 sind Flammen durch rechtwinklig zur Fassade wehenden Wind verlängert, seitlich abgetrieben und um die Hausecke geführt worden.

Durch diesen Effekt erfuhr beim Versuch 5 die am Balkonplattenrand der Symmetrieachse des Fensters F_2 stehende Betonaußenstütze nur eine geringe Brandbeanspruchung. Die Giebelwand jedoch zeigte im Bereich der Balkonnische und auf der Giebelseite starke thermisch bedingte Zerstörungen (Risse, Putzabplatzungen und Zermürbungen). Den Ergebnissen zufolge, die bei Versuch 5 mit dem Meßturm gewonnen wurden, sind mindestens 60 % der Heißgase, die ohne Windeinfluß aus dem Fenster des Raumes 1 ausgeströmt wären, über den Flur in Raum 2 eingeströmt. Deshalb hat in diesem Versuch auch die vor Raum 1 stehende Außenstütze IPB 240 nur eine relativ geringe Temperaturerhöhung gezeigt.

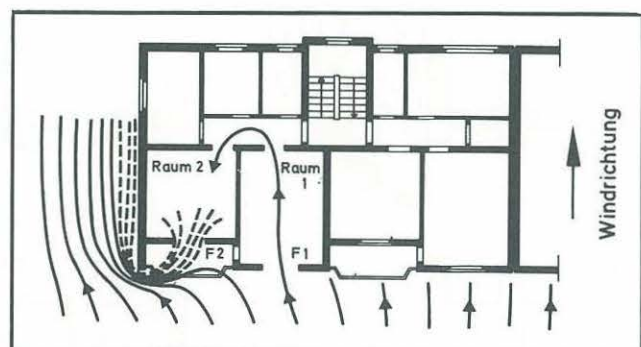


Bild 6-56: Stromlinien des Windes und der Heißgase zu Bild 6-55

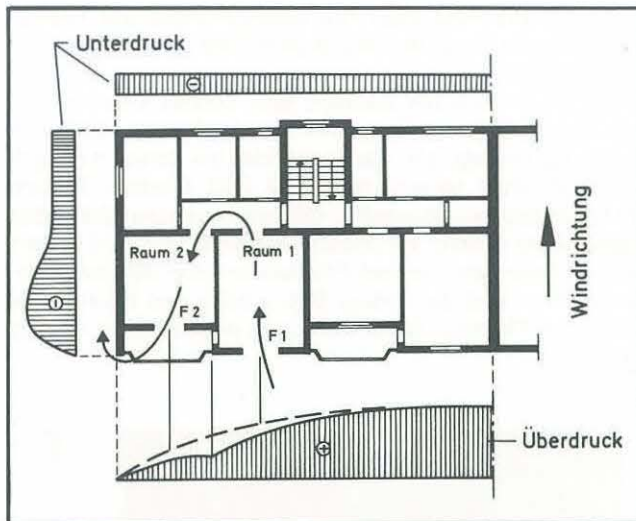


Bild 6-57: Rechnerische Druckverteilung am Versuchshaus (während Versuch 5, zeitweise)

Nach Durchzünden des Feuers und nach Zerspringen der Fensterscheibe in Raum 6 (Bild 6-58) trat dort zeitweise derselbe Effekt ein. Durch die beiden Fenster der Räume 1 und 2 strömte infolge des dort herrschenden Überdruckes Frischluft in das Gebäude. Diese Frischluft wurde dem Raum 6 über den Flur zugeführt und bewirkte dort ein rasches Abbrennen der Brandlast. Infolge des giebelseitigen Unterdruckes wurden die Rauchgase aus Raum 6 mit hoher Geschwindigkeit durch das Fenster gesogen. Es kamen so Längen des leuchtenden Teils der Flammen von bis zu ca. 7 m zustande.

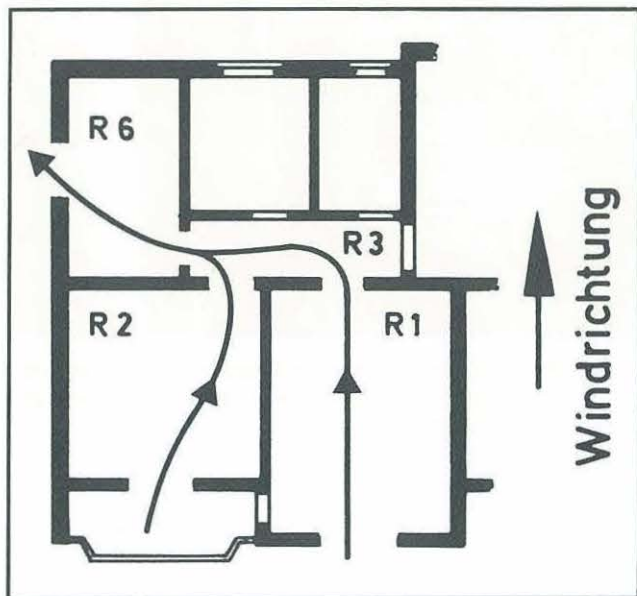


Bild 6-58: Luftströmung im Gebäude zu Ende des Versuches 5

6.2.6. Der Wärmeinhalt der Heißgase, die aus der Brandraumöffnung ausströmen

Wie bereits erwähnt, transportieren die Heißgase Wärmeenergie aus dem Brandraum ins Freie. Kennt man die Temperatur ϑ und die Geschwindigkeit v der Heißgase, so läßt sich die pro Flächeneinheit aus dem Fenster austretende Energiemenge errechnen.

Betrachtet man zunächst einen Brandraum mit nur einer Öffnung der Größe $F_F = b_F \cdot h_F$ (Bild 6-46), so läßt sich der aus dem Fenster ausströmende Massenstrom, der nur vom Dichteunterschied zwischen Heißgas und der kalten Umgebung abhängig ist, nach der Gleichung

$$\dot{M} = v \cdot F_a \quad (6.14)$$

errechnen, wobei

F_a der obere Teil der Brandraumöffnung ist, durch den die Heißgase ausströmen.

Es ist nach Bild 6-46

$$F_a = b_F \cdot h_F'' \quad (6.15)$$

Der austretende Massenstrom errechnet sich dann zu

$$\dot{M}_a = \frac{2}{3} \varphi_a \cdot b_F \cdot \rho_{Br} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_K}{\rho_{Br}} - 1 \right)} \cdot (h_F'')^{\frac{3}{2}} \quad [\text{kg/s}] \quad (6.16)$$

Die mitgeführte Wärmeenergie ist dann

$$Q = \dot{M} \cdot c_p \cdot T \quad [\text{kcal}] \quad (6.17)$$

Es ist dabei c_p [kcal/kg°C] die spezifische Wärmekapazität der Rauchgase, T [°K] = die absolute Temperatur der Rauchgase.

Geht man davon aus, daß sich die Abbrandgeschwindigkeit der Brandlast näherungsweise durch die Formel

$$R = 6 \cdot F_F \cdot \sqrt{h_F} \quad [\text{kg Holz/min}] \quad (6.18)$$

bestimmen läßt und nimmt als unteren Heizwert des Holzes $H_u = 4.000$ kcal/kg an, so läßt sich zu jedem Zeitpunkt des Brandes zeigen, welcher Anteil der freiwerdenden Energie aus dem Brandraum ausströmt und welcher Teil die Brandraumumschließungsflächen aufheizt. Die anhand der gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe aufgestellten Wärmebilanzen zeigen, daß – wenn kein Windeinfluß vorhanden war – zwischen 50 und 60 % der Energie durch die Öffnungen der Gebäudeaußenfront ausströmen.

Dies soll am Beispiel des Versuches 1 gezeigt werden:

Es werden folgende Zahlenwerte vorausgesetzt:

Brandraumöffnung:

Breite $b_F = 1,70$ [m]

Höhe $h_F = 1,60$ [m]

Fläche $F_F = 2,72$ [m²]

Brandraumtemperatur

$\vartheta_{Br} = 950$ [°C]

$T_{Br} = 1223$ [K]

Dichte der Rauchgase bei

Brandraumtemperatur

$\rho_{Br} = 0,3$ [kg/m³]

Spezifische Wärmekapazität der

Rauchgase bei

Brandraumtemperatur

$c_{pBr} = 0,3$ [kcal/kg°C]

Umgebungstemperatur

$\vartheta_K = 15$ [°C]

$T_K = 288$ [K]

Dichte der einströmenden

Kaltluft

$\rho_K = 1,2$ [kg/m³]

Spezifische Wärmekapazität der

einströmenden Kaltluft

$c_{pK} = 0,2$ [kcal/kg°C]

Die Wärmebilanz ergibt nun folgende Werte:

An Verbrennungswärme wird im Brandraum nach Gl. (6.18) frei:

$$Q_1 = 6 \cdot F_F \cdot \sqrt{h_F} \cdot H_u = 6 \cdot 2,72 \cdot \sqrt{1,6} \cdot \frac{4000}{60} = 1376 \text{ [kcal/sec]} \quad (100 \%)$$

Durch den oberen Teil der Brandraumöffnung strömt nach Gl. (6.16) folgender Massenstrom aus:

$$\dot{M}_a = \frac{2}{3} \cdot 0,7 \cdot 1,7 \cdot 0,3 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \left(\frac{1,2}{0,3} - 1 \right)} \cdot (0,68 \cdot 1,6)^{\frac{3}{2}} = 2,1 \text{ [kg/sec]}$$

Die mitgeführte Wärmeenergie beträgt

$$Q_{2a} = \dot{M}_a \cdot C_{p_{Br}} \cdot T_{Br} = 2,1 \cdot 0,3 \cdot 1223 = 771 \text{ [kcal/sec]}$$

Durch das Fenster strömt nach Gleichung (6.8) als Frischluftmassenstrom ein

$$\dot{M}_e = \frac{2}{3} \cdot 0,7 \cdot 1,7 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \left(1 - \frac{0,3}{1,2} \right)} \cdot 0,32 \cdot 1,6^{\frac{3}{2}} = 1,32 \text{ [kg/sec]}$$

An Wärmeenergie wird somit in den Brandraum eingebracht:

$$Q_{2b} = - \dot{M}_e \cdot C_{p_k} \cdot T_k = - 1,32 \cdot 0,2 \cdot 288 = - 76 \text{ [kcal/sec]}$$

Durch den Heißgasstrom wird aus dem Brandraum abgeführt:

$$Q_2 = 695 \text{ [kcal/sec]} \quad (49 \%)$$

Durch den unteren Teil der Brandraumöffnung ($\sim \frac{1}{3} h_F$) wird an Energie abgestrahlt:

$$Q_3 \cong \left(\frac{1}{3} \cdot F_F \right) \cdot \epsilon_s \cdot 4,88 \left(\frac{T_{Br}}{100} \right)^4 \cdot \frac{1}{3600} = \frac{1}{3} \cdot 2,72 \cdot 0,8 \cdot 4,88 \left(\frac{1223}{100} \right)^4 \cdot \frac{1}{3600} = 24 \text{ [kcal/sec]} \quad (\sim 2 \%)$$

Damit entweichen aus dem Brandraum:

$$Q_2 + Q_3 = 719 \text{ [kcal/sec]} \quad (\sim 52 \%)$$

Die Brandraumumschließungsbauteile werden aufgeheizt von

$$Q_4 = 657 \text{ [kcal/sec]} \quad (\sim 48 \%)$$

Bei Windeinfluß und Querbelüftung der Brandräume waren die Anteile der aus dem Gebäude entweichenden Energiemengen zum Teil wesentlich größer. So entweichen bei Versuch 8 durch das giebelseitige Fenster des Raumes 1 der Wohnung 8 etwa 90 % der freigewordenen Energie infolge Querlüftungseinfluß nach außen. Durch die durchgebrannte Balkontür und die Tür zwischen Raum 8 und dem Flur strömte mehr Frischluft zu als die Holzkrippen (90 kg Holz/m²) zum Abbrennen benötigten.

Die Brandraumtemperaturen blieben demzufolge trotz der hohen Brandlast auf relativ niedrigen Werten (siehe Bild 6–29). Bei diesem Versuch wurden Ausströmgeschwindigkeiten der Heißgase bis zu 12 m/sec festgestellt. Bei diesen hohen Strömungsgeschwindigkeiten wurde somit zeitweise die dreifache Energiemenge pro Zeiteinheit (ungefähr 2 100 kcal/sec) aus dem Brandraum transportiert, die ohne Windwirkung aus derselben Fensteröffnung entweichen wären (ungefähr 700 kcal/sec).

6.2.7 Erkenntnisse über die Möglichkeiten der Brandübertragung über die Außenfront

In Bild 6–60 sind die während aller Lehrter Versuche mit natürlichen Bränden aufgetretenen Heißgasstromsituationen zusammengefaßt. Die Zustände, bei denen die Heißgasstromachse nahezu horizontal liegt (Fenster F7 und F16), traten nur kurzzeitig während kräftiger Windböen (geschätzte örtliche Windgeschwindigkeit bis zu 20 m/sec) auf. Im Falle des Fensters F16 konnte außerdem beobachtet werden, daß die äußere Begrenzung des leuchtenden Teiles der Flammen bis zu 2,5 m von der Hausfront weg lag (Bild 6–59).



Bild 6–59: Flammenbild des Heißgasstromes, bei dem die Grenze der leuchtenden Flammen 2,5 m von der Hauswand ablag

Den vorliegenden Meßergebnissen und Versuchsbeobachtungen entsprechend können über den Mechanismus der Brandübertragung außerhalb des Gebäudes für bestimmte Fälle folgende Aussagen gemacht werden:



Bild 6–60: Isothermen des Heißgasstromes für verschiedene Windrichtungen und -geschwindigkeiten

	rechtwinklig zur Fassade	quer
Fenster 1	3 m/s	5 m/s
Fenster 4	4 m/s	1 m/s
Fenster 5	2 m/s	4 m/s
Fenster 6	2 m/s	3 m/s
Fenster 7	2 m/s	10 m/s
Fenster 9	10–11 m/s	—
Fenster 10	3 m/s	—
Fenster 11	2 m/s	—
Fenster 12	2 m/s	—
Fenster 13	3 m/s	—
Fenster 14	3 m/s	—
Fenster 16	4 m/s	» 10 m/s

Fall 1: Die Fenster des über dem Brandraum liegenden Zimmers sind geöffnet

Es hat sich herausgestellt, daß eine über dem Brandraum befindliche Fensteröffnung das Temperatur- und Strömungsfeld vor der Fassade beeinflusst. Solange die Umfassungsbauteile des Raumes, vor dessen offenem Fenster der Heißgasstrom aufsteigt, dicht und die in diesen Raum führenden Türen geschlossen sind, herrscht im gefährdeten Raum selbst gegenüber der Umgebung ein leichter Unterdruck, der aus der Saugwirkung der strömenden Heißgase entsteht. Im Bereich der Fensteröffnung rückt die Achse des Temperaturfeldes mehr an die Hauswand heran, entfernt sich jedoch mit zunehmender Höhe wieder von ihr (Bild 6–61).

Während der Versuche strömten, solange dieser Zustand erhalten blieb, keine Heißgase durch die Fensteröffnung in den oberen Raum ein. Im allgemeinen Fall jedoch besteht die Gefahr, daß leicht entzündbare Materialien in

Fensternähe Feuer fangen und den Brand dann in den Raum hinein übertragen. Da infolge von Turbulenzen der Luftunterdruck im oberliegenden Raum ständig um einen Mittelwert schwankt, ist es durchaus möglich, daß z. B. leichte Gardinen in Bewegung geraten und in den Heißgasstrom hineinwehen. Bei zusätzlicher Querwindeinwirkung (Hauptwindkomponente parallel zur Fassade), welche die Saugwirkung am oberliegenden Fenster noch vergrößert, ist dies sogar mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Dies konnte während Versuch 8 beobachtet werden. Ein Feuerübersprung fand jedoch nicht statt, da die zu Versuchszwecken aufgehängten Gardinen aus Glasfasern gefertigt waren.

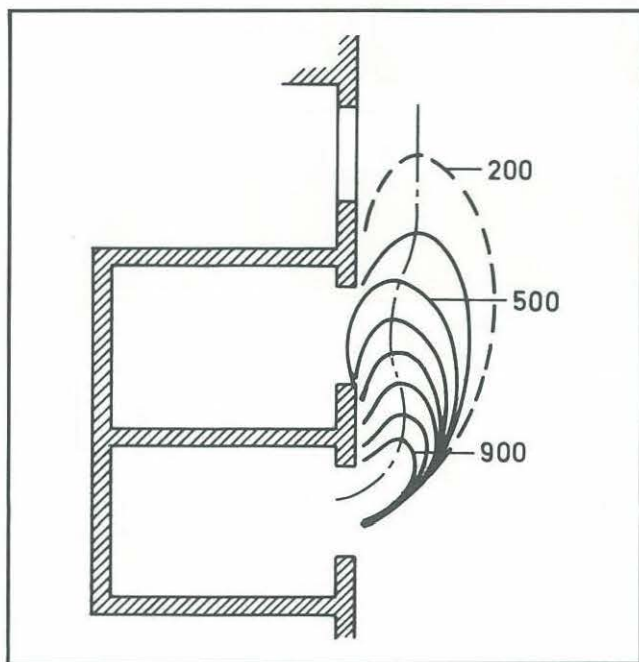


Bild 6-61: Isothermenverlauf, wenn sich in der Frontwand eine Öffnung befindet, hinter der ein „geschlossener“ Raum liegt.

Sobald in dem obenliegenden Raum jedoch eine oder mehrere Türen geöffnet sind und die Möglichkeit der Querlüftung besteht, kann sich in dem Raum kein Unterdruck mehr aufbauen, sondern es entsteht eine Luftströmung in Richtung Heißgasstrom, da dieser durch die Fensteröffnung Luft ansaugt. Theoretisch müßte sich dann die Achse des Temperaturfeldes geringfügig vom Gebäude entfernen. Dies konnte jedoch anhand der Versuchsergebnisse nicht nachgewiesen werden (Meßgenauigkeit nicht ausreichend). Leichte Gardinen würden in diesem Fall aus dem Fenster heraus in den Heißgasstrom hineingesogen, da in diesem Fall nach [30] mit Lufteintrittsgeschwindigkeiten von ca. 0,3 m/sec zu rechnen ist.

Ist nun die Hauptkomponente eines Windes rechtwinklig auf die Frontwand gerichtet, so strömen Heißgase, wenn in dem obenliegenden Raum die Fenster geöffnet sind und Querlüftung möglich ist, in den Raum ein (Bild 6-62). Die Achse des Temperaturfeldes ist – soweit sie sich anhand der Meßwerte verfolgen läßt – einsinnig gekrümmt.

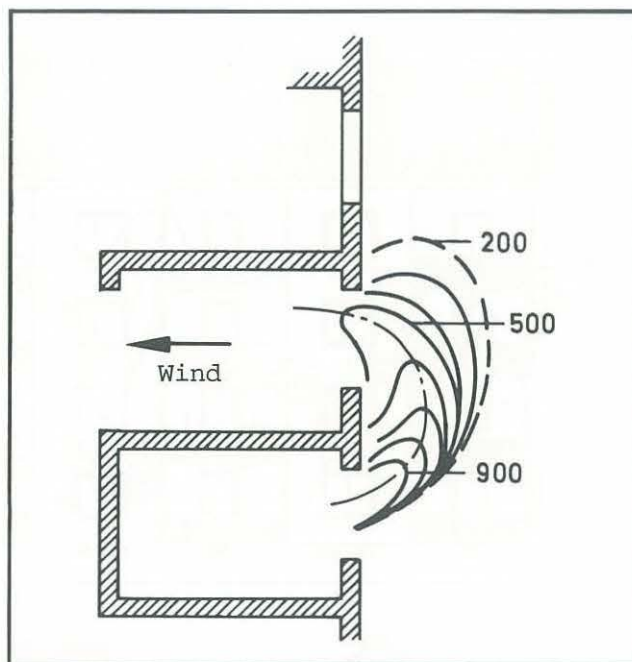


Bild 6-62: Verlauf der Isothermen, wenn der Brandraum nur eine Belüftungsöffnung hat, der darüberliegende Raum mehrere Öffnungen besitzt und Wind mit der Hauptkomponente rechtwinklig zur Frontwand weht.

Die Heißgase streichen dann an der Decke des über dem Brandgeschoß liegenden Raumes entlang. So wurden z. B. während Versuch 6 im Bereich der Decke über 18 Minuten Temperaturen zwischen 400 und 500° C gemessen. Die auf dem Boden des Raumes lagernde Brandlast (Holzkrippen) entzündete sich dabei nicht; der Feuerübersprung blieb aus. Es kann jedoch angenommen werden, daß brennbare Materialien, die in Fensternähe im Deckenbereich angebracht gewesen wären, unter den vorliegenden Bedingungen gezündet hätten.

Fall 2: Die Fenster des über dem Brandraum liegenden Geschosses sind geschlossen

Die Scheiben der Fenster des Versuchshauses waren aus normalem Fensterglas ($d = 3 \text{ mm}$) hergestellt und an hölzernen Rahmen angeschlagen und verkittet. Alle Scheiben, an denen über längere Zeit Flammen bzw. Heißgase entlangstrichen zersprangen und fielen – meist in größeren Stücken – heraus. Sie hielten der Beflammung im allgemeinen zwischen 5 und 15 Minuten stand. Vom Zeitpunkt des Fehlens der Fensterscheiben an gelten für die restliche Branddauer die für den Fall 1 getroffenen Feststellungen. Vorher können jedoch keine Heißgase in den brandgefährdeten oberen Raum einströmen. Es können jedoch erhebliche Mengen an Strahlungswärme in den Raum gelangen. Diese sind eine Funktion der Temperatur der Heißgase, ihrer Zusammensetzung und der Geometrie des vor dem Fenster strahlenden Heißgaskörpers. Sie können aufgrund der nunmehr vorliegenden Meßergebnisse und Erkenntnisse nach [30] rechnerisch ermittelt werden.

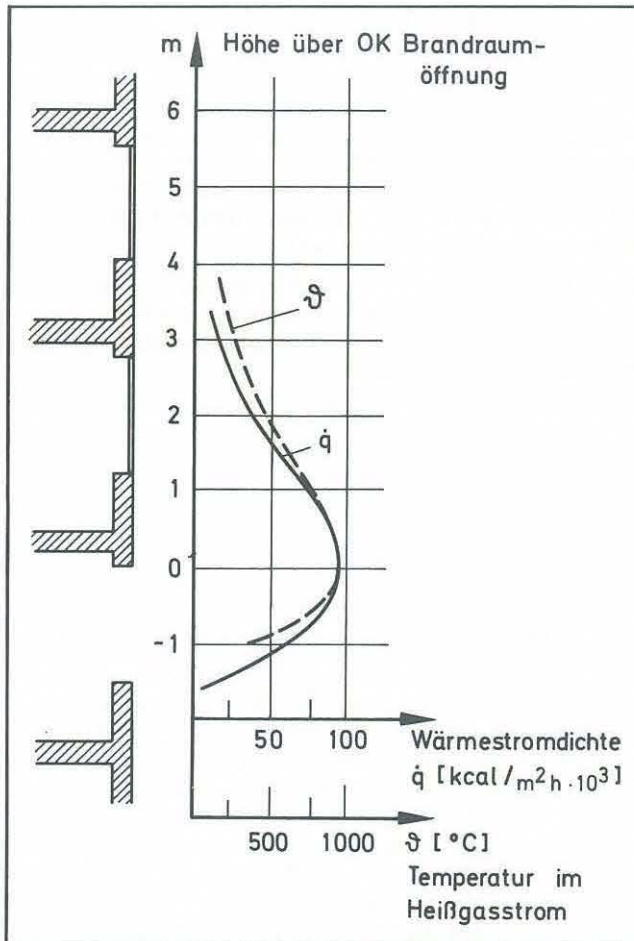


Bild 6-63: Temperatur längs der Achse und vom Heißgasstrom in Gebäuderichtung ausgehende Wärmestromdichte (ohne Windeinwirkung)

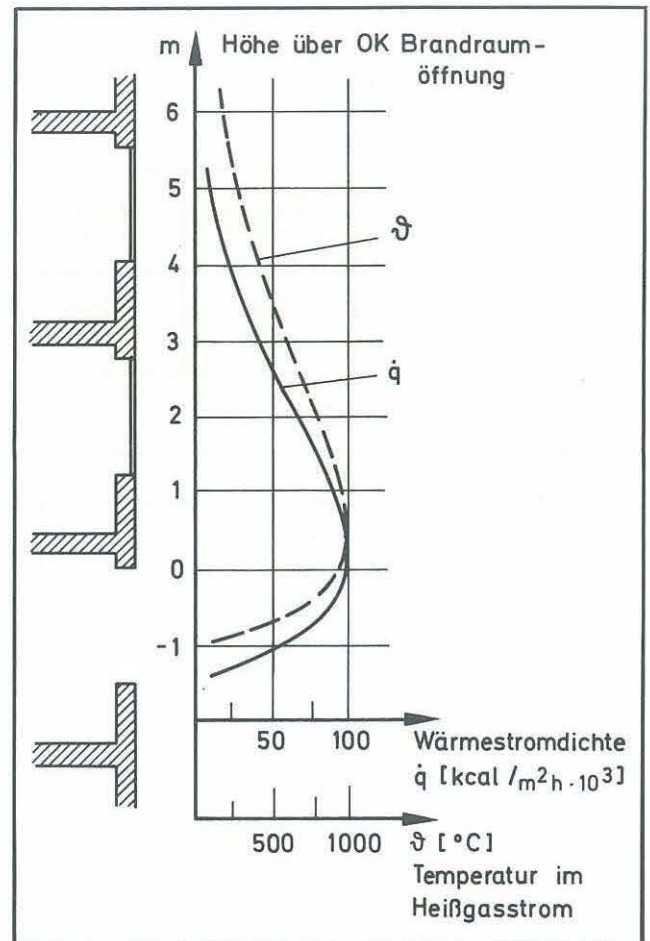


Bild 6-64: Temperatur längs der Achse und vom Heißgasstrom in Gebäuderichtung ausgehende Wärmestromdichte (mit Windeinwirkung)

In den Bildern 6-63 und 6-64 sind die Wärmestromdichten aufgezeigt, die vom Heißgasstrom längs der Achse in Richtung des Brandhauses ausgingen. Von dieser Wärmebelastung wird also eine Fläche, die im Raum unmittelbar hinter der Fensterscheibe rechtwinklig zur Strahlungsrichtung steht, getroffen. Ein Teil dieser Energie wird jedoch reflektiert. Je nach Beschaffenheit der Fläche wird die mit der Emissionszahl ε multiplizierte ankommende Wärmestrahlung aufgenommen. Die Werte der Emissionszahlen können dem VDI-Wärmeatlas [34] entnommen werden.

Als Richtwert kann man nach [35] für organische Substanzen annehmen, daß sie sich ab einer Wärmebelastung von 8×10^3 bis $11 \times 10^3 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}$ thermisch zersetzen oder Feuer fangen.

Im allgemeinen befindet sich die durch Wärmestrahlung gefährdete Fläche nicht in der Fensterebene, sondern in einem Abstand dahinter. Mit zunehmendem Abstand von der Wärmequelle nimmt jedoch die Intensität der Strahlung rasch ab. Dies kann durch Einführen der Einstrahlzahl berücksichtigt werden. Der auf die in Frage stehende Fläche übergehende Wärmestrom ist dann $q_u = \varepsilon \cdot \varphi \cdot q_a$. Für eine Fläche, die etwa gleich groß ist wie die Fensterfläche, ist in Bild 6-65 die Einstrahlzahl in Abhängigkeit vom Abstand der Fläche vom Fenster dargestellt.

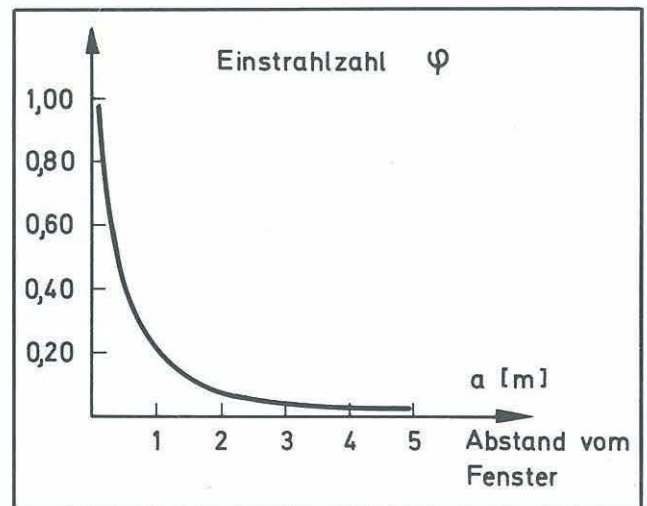


Bild 6-65: Einstrahlzahl φ in Abhängigkeit des Abstandes der betrachteten Fläche von der Fensterebene

Demnach ist schon in etwa 0,5 m Abstand vom Fenster die Strahlungsintensität nur noch halb so groß wie in der Fensterebene. In 2 m Abstand vom Fenster treffen auf die in Frage stehende Fläche nur noch weniger als 10 % der vom Heißgasstrom in den Brandraum abgegebenen Wärmestrahlung auf.

Als Auswirkung der Wärmestrahlung auf den Menschen können nach [35] die in Bild 6–66 und Tabelle 6.1 angegebenen Werte angenommen werden.

Tabelle 6.1

Wärmebelastung kcal/h m ² · h	Schmerz- schwelle	Blasen- bildung
5.430	8 sec	20 sec
14.400	0 sec	5 sec

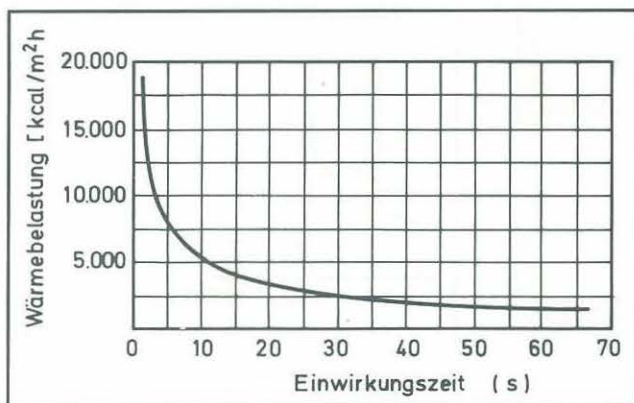


Bild 6–66: Expositionszeit bis zur Erreichung der Schmerzschwelle bei ungeschützter Haut in Abhängigkeit von der Wärmebelastung nach [35]

Setzt man nun den in Bild 6–32 dargestellten Verlauf der Maximaltemperatur im Heißgasstrom (kein Windeinfluß) voraus, so beträgt die in das über dem Brandraum liegende Fenster eingestrahlte mittlere Energiemenge ca. 3×10^4 kcal/m²h. Dies würde bedeuten, daß ein Mensch, der sich unmittelbar am Fenster aufhält, sofort an den unbedeckten Stellen Hautblasen bekäme. Befände sich ein Mensch im Abstand von 1 m vom Fenster, so treffen ihn nach Bild 6–65 nur noch etwa 20 % der Strahlung, also $0,2 \times 3 \times 10^4 = 0,6 \times 10^4$ kcal/m²h, d. h. bis zum Erreichen der Schmerzschwelle würde es etwa 8 Sekunden dauern.

Im Abstand von 2,5 m vom Fenster – also etwa in der Mitte des Raumes 1 des Lehrter Brandhauses – ist die auftretende Strahlungsenergie nur noch etwa $0,05 \times 3 \times 10^4 = 0,15 \times 10^4$ kcal/m²h. Nach Bild 6–66 liegt diese Wärmebelastung unterhalb der Grenze, bei der die Schmerzschwelle nach kurzer Expositionszeit erreicht wird. Während eines Brandes könnten sich also in einem Gebäude mit der minimalen Stockwerkshöhe von $h_{St} = 2,50$ m und Fenstergrößen, die etwa 25 % der Außenwandfläche sind, Menschen in dem über dem Brandgeschoß befindlichen Raum aufhalten, ohne durch thermische Beeinflussungen geschädigt zu werden, auch bei Verlängerung der Flammen durch Windeinfluß (Bild 6–64), sofern die Fensterscheiben des Raumes nicht zerstört wurden.

Befinden sich im Raum über dem Brandgeschoß Materialien, die leicht thermisch zersetzbar (ab etwa 8×10^3 kcal/m²h) und leicht entflammbar sind, so können diese sich, auch bei geschlossenen Fensterscheiben, entzünden, wenn sie in Fensternähe (Abstand ≤ 30 cm) angebracht sind und die zur Zündung erforderliche Zeitdauer der Bestrahlung kleiner ist als die Dauer des Auftretens hoher Temperaturen vor der Fassade.

Im Fall des Versuchs 1 traten während mehr als 20 Minuten Branddauer solche hohen Temperaturen vor der Fassade auf. Die Expositionszeiten bis zum Zünden leicht entflammbarer Stoffe liegen jedoch bei den vorerwähnten Wärmebelastungen im Bereich weniger Minuten⁺⁾ . Bei einem Brandgeschehen vor der Fassade, wie es bei Versuch 1 auftrat, kann ein Feuerübersprung vom Brandraum auf das nächsthöhere Geschoß auch stattfinden, wenn dort die Fensterscheiben nicht gesprungen sind.

Diese Feststellung stimmt mit Erkenntnissen aus amerikanischen Versuchen [36] überein, wonach textile Fußbodenbeläge üblicher Art bei Wärmeeinwirkung von etwa 10^4 kcal/m²h nach kurzer Zeit zünden.

⁺⁾ entnommen aus Untersuchungsberichten des Instituts für Holzforschung, Winzerstraße 45, 8000 München.

Fall 3: Über dem Brandraum kragen Balkonplatten aus

Bild 6–39 ist unmittelbar zu entnehmen, daß ohne Windeinfluß und ohne Brandlast auf den Balkonplatten ein Feuerübersprung auf das über dem Brandraum liegende Geschoß nicht stattfinden kann. Sofern die Fenster im gefährdeten Raum geöffnet sind und Querlüftung möglich ist, sind die einströmenden Rauchgase schon auf $\vartheta \leq 200^\circ$ C abgekühlt, so daß eine Zündung leicht entflammbarer Materialien unwahrscheinlich ist. Ebenso sind die Strahlungsintensitäten des am Plattenrand aufsteigenden Stromes im Bereich des Fensters des gefährdeten Raumes so weit abgeklungen, daß die vorerwähnten Mindestwärmestromdichten zur Zersetzung organischer Materialien nicht mehr erreicht werden.

Sobald jedoch auf der Balkonplatte Brandlast lagert, ist mit einem Übergreifen des Feuers auf den gefährdeten Raum zu rechnen. Lagert eine relativ hohe Brandlast auf dem Balkon, so ist mit dem in Fall 1 und Fall 2 beschriebenen Vorgängen zu rechnen. Ist der Betrag der Brandlast gering, so dürfte diese nur als „Zündschnur“ wirken, d. h. ein Feuerübersprung findet nur statt, wenn bei geöffneten Fenstern oder zersprungenen Scheiben leicht entflammbare Materialien Feuer fangen können. Eine Zündung durch Strahlungswärme hoher Intensität kann ausgeschlossen werden.

Bei Windeinwirkung von der dem Brandraumfenster, aus welchem die Heißgase ausströmen, abgelegenen Seite, verlängert sich die Flamme in der gleichen Größenordnung wie in Kapitel 6.2.5 gezeigt, wenn der Brandraum zwei gegenüberliegende Öffnungen hat. Dies bedeutet, daß der Hochpunkt der 500° C-Isotherme nach oben wandert. Während der Versuche 2, 3, 4, 5, 6 und 8 konnte festgestellt werden, daß das Ansteigen des Hochpunktes der 500° C-Isotherme innerhalb der Meß- und Beobachtungsgenauigkeit in der gleichen Größenordnung liegt wie im Falle der ebenen Frontwand.

Da bei Windeinfluß Balkonplatten und Brüstungselemente umströmt werden können und trotz des langen „Flammenweges“ der Hochpunkt der 500° C-Isotherme auf der gleichen Höhe wie im Falle der ebenen Frontwand liegt, können diese einen möglichen Feuerübersprung von einem in Brand geratenen Geschoß auf das nächsthöhere nicht verhindern. Dieselbe Feststellung gilt auch für senkrechte Blenden im Bereich der Frontwand. Auch sie werden vom Feuer bei Windeinwirkung umlaufen (Bild 6–55 und Bild 6–56).

7. Untersuchungen an Innenbauteilen

7.1. Untersuchungen an durchlaufenden Stahlbetonplatten

7.1.1. Allgemeines

Bisherige Untersuchungen über das Tragverhalten von Stahlbetonplatten unter Brandbeanspruchung wurden im wesentlichen mit klar definierten Randbedingungen, d. h. mit statisch nachweisbarem Tragverhalten, in Anlehnung an DIN 4102 Blatt 2 durchgeführt [39, 40, 41, 42].

In vielen Gebäuden sind jedoch zusätzliche Tragreserven vorhanden, die bisher quantitativ nicht abgeschätzt werden konnten und daher nicht bei der Beurteilung des Brandverhaltens von Stahlbetonplatten angesetzt werden durften. Der Einfluß von konstruktiven Einspannungen und Dehnungsbehinderungen, von konstruktivem Querabtrag und von statisch nicht berücksichtigten Zwischenauflagern wurde bei der Einstufung in Feuerwiderstandsklassen außer acht gelassen.

Im Rahmen des Forschungsauftrages „Brandversuche Lehrte“ bestand die einmalige Gelegenheit, das Brandverhalten großflächiger, einachsig gespannter Durchlaufplatten aus Stahlbeton im Bauwerk zu untersuchen. Neben den Versuchen mit natürlicher Brandlast, bei denen u. a. auch

das Verhalten der Stahlbetondecken untersucht wurde, sollten in 3 Versuchen mehrere Räume nach der Einheits-temperaturkurve gemäß DIN 4102 Blatt 2, Ausgabe 1970, aufgeheizt werden, um den direkten Vergleich zu Versuchen an klar definierten Plattenstreifen im Labor zu ermöglichen. Hierzu konnten Ergebnisse aus dem Forschungsauftrag „Stahlbetondurchlaufplatten“ [39] herangezogen werden.

7.1.2. Versuchsprogramm und Beschreibung der Deckensysteme

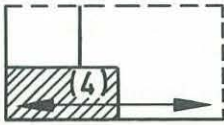
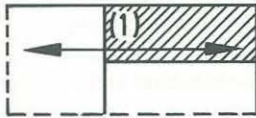
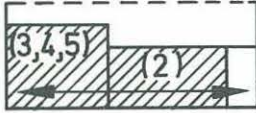

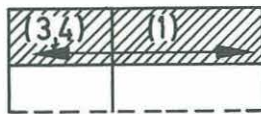
Das Versuchsprogramm für das Forschungsvorhaben „Brandversuche Lehrte“ wird noch einmal in der folgenden Tabelle 7.1 im Hinblick auf das Teilprojekt „Stahlbetonplatten“ zusammengestellt. Als entscheidende Kriterien sind das statische System und die Randbedingungen anzusehen.

Der Deckenaufbau war bei allen Versuchen der gleiche mit:

Zementestrich	3,0 cm
Dämmschicht (Mineralfasermatten)	2,0 cm
Stahlbetonplatte	15,0 cm
Putz	0,7 – 1,5 cm

Der schwimmende Estrich wurde bei den meisten Versuchen entfernt, um eine bessere Rißeobachtung auf der Decke zu ermöglichen.

Tabelle 7.1: Versuchsprogramm Stahlbetondecken

Versuch	Wohnung Raum	Brandlast	beflammte Deckenflächen	Auflast	Belastung
				Anzahl der Geschosse	p [kp/m ²]
02	1 4	Holz 30 kg/m ²		3	–
1	2 1	Holz 30 kg/m ²		3	–
3	11	Wohnmobiliar	gesamte Wohnung	1	–
4	2	Holz 30 kg/m ²	gesamte Wohnung	3	–
5	5	Holz 15–60 kg/m ²	gesamte Wohnung	2	–
6	3	Holz 15–60 kg/m ²	gesamte Wohnung	3	30 kp/m ² (Raum 1)
8	8	Holz 90 kg/m ²	gesamte Wohnung	2	90 kp/m ² (Raum 1)
9	1 2, 3, 4, 5	Öl (ETK)		3	~ 200 kp/m ²
10	4 1, 3, 4	Öl (ETK)		3	~ 200 kp/m ²
11	6 1, 3, 4	Öl (ETK)		2	~ 200 kp/m ²

7.1.2.1. Baustoffe

Zur Feststellung der Betongüte der Stahlbetondecken wurden vor den Brandversuchen von jeder Decke Bohrkerns gezogen. Es wurden folgende mittlere Betondruckfestigkeiten ermittelt:

Tabelle 7.2: Betondruckfestigkeiten

Bauteil		Betondruckfestigkeit
Decke über EG	Haus 1	177 kp/cm ²
	Haus 2	142 kp/cm ²
Decke über 1. OG	Haus 1	226 kp/cm ²
	Haus 2	175 kp/cm ²
Decke über 2. OG	Haus 1	199 kp/cm ²
	Haus 2	235 kp/cm ²

Die Solldruckfestigkeit von $\sigma_b = 225 \text{ kp/cm}^2$, die der statischen Berechnung zugrunde gelegt wurde (B 225), konnte nur bei zwei Decken erreicht werden.

Als Bewehrungsstahl wurden geschweißte Sonderbetonstahlmatten St. IVb verwendet. Der Auswertung wurde ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm zugrunde gelegt, das sich als Mittel aus mehreren Stahlzugproben ergab (siehe Bild 7-1).

Die Mauerwerkswände wurden teilweise aus Hohlblocksteinen Hbl 25/Mörtelgruppe II, teilweise aus Mauerwerk Mz 150/Mörtelgruppe II hergestellt. In Auflagerbereichen von Unterzügen wurden in einigen Fällen höhere Mauerwerks- bzw. Mörtelgüten verwendet.

7.1.2.2. Statische Systeme

Für die Beurteilung des Brandverhaltens der untersuchten Deckenfelder ist die Gegenüberstellung des statischen Systems gemäß der statischen Berechnung und des Plattensystems im Einbauzustand von entscheidender Bedeutung. Eine Zusammenstellung der verschiedenen Systeme ist in der folgenden Tabelle 7.3 enthalten.

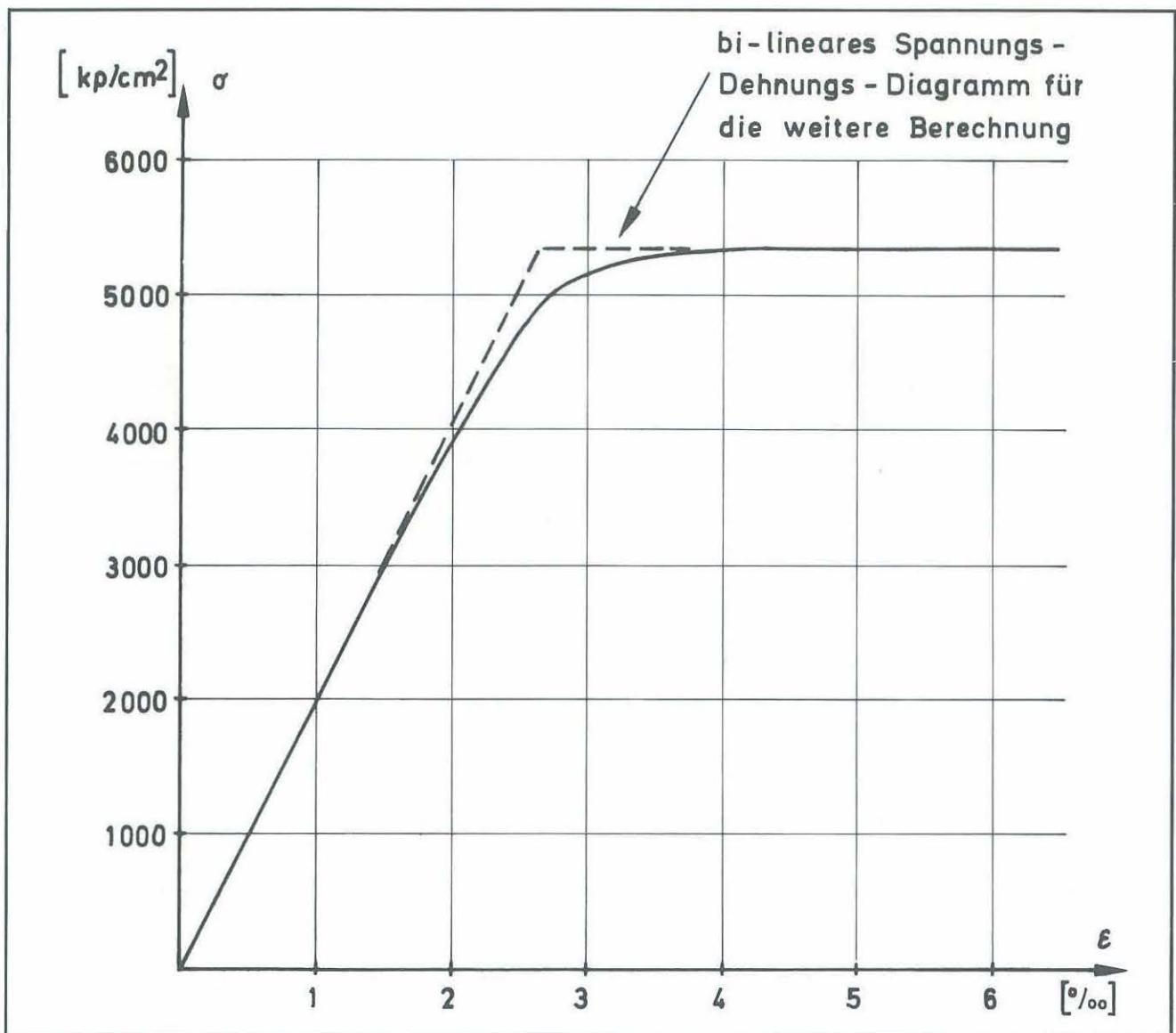
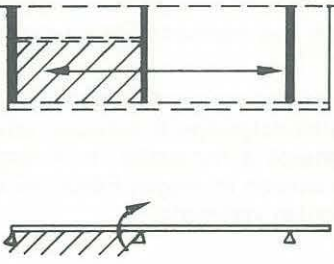
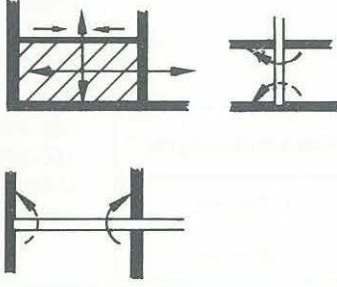
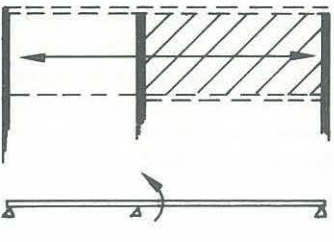
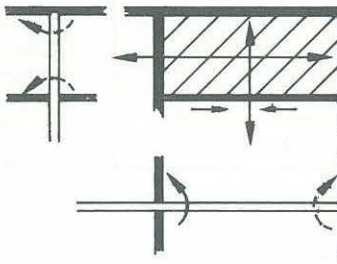
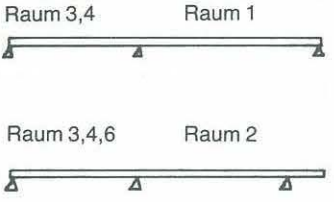
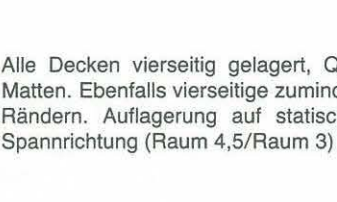
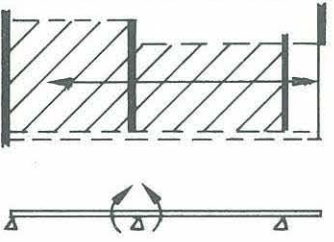
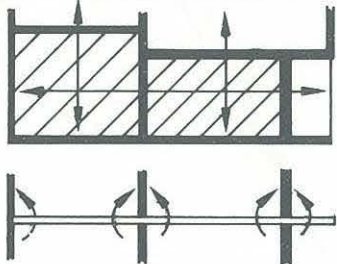
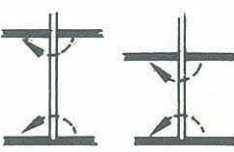
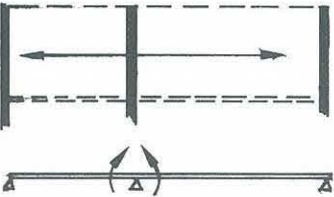
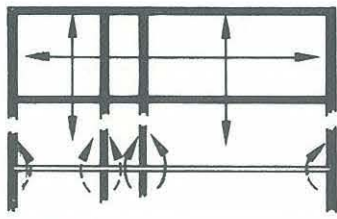



Bild 7-1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der verwendeten Betonstahlmatten (im Versuch im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig ermittelt)

Tabelle 7.3: Statische Systeme

Versuch Nr.	gemäß Statik	Platte im Einbauzustand	Beschreibung des Einbauzustandes
02			Die beheizte Platte ist vierseitig gelagert und trägt auch in Querrichtung ab. An allen 4 Seiten ist die Platte mindestens konstruktiv eingespannt. Die Horizontalverschiebung der Ecken wird behindert.
1			Die Bereiche der nicht beheizten Plattenteile bewirken eine Dehnungsbehinderung, die Horizontalverschiebung der Platten wird durch Reibung zwischen MW und Platte sowie durch Auflast behindert.
3-8			Alle Decken vierseitig gelagert, Querabtrag durch Querbewehrung der Matten. Ebenfalls vierseitige zumindest konstruktive Einspannung an allen Rändern. Auflagerung auf statisch nicht berücksichtigter Wand \perp zur Spannrichtung (Raum 4,5/Raum 3) Behinderung siehe Versuch 02 und 1.
9			 Bemerkungen s. o.
10+11			 Bemerkungen s. o.

Für die statische Berechnung kann der Querabtrag im allgemeinen nicht berücksichtigt werden, da in den meisten Fällen die Querbewehrung ohne voll tragfähige Stöße verlegt wird.

Für den baupraktischen Einbauzustand spielt jedoch auch der Querabtrag eine wesentliche Rolle, da auch bei geringerer Verankerungslänge der Querbewehrung Zugkräfte in Querrichtung übertragen werden, wie Reißbilder an vierseitig gelagerten, einachsigen gespannten Platten zeigen.

Theoretisch könnten andere vergünstigende Komponenten wie z. B. konstruktive Randeinspannung oder Auflagerung auf „nichttragenden“ Wänden in der Statik mit berücksichtigt werden, im allgemeinen wird – so auch beim Objekt Lehrte – darauf verzichtet, um im Hinblick auf die Bewehrung und die Ausführung einfache Verhältnisse zu haben und um bei den als nichttragend angenommenen Wänden nur Mindestforderungen der DIN 1053 erfüllen zu müssen. In solchen Fällen sind sowohl aus statischer als auch aus brandschutztechnischer Sicht Reserven vorhanden, besonders dann, wenn die nach DIN 1045 vorgeschriebene konstruktive Rand- und Einspannbewehrung eingebaut wird.

7.1.3. Versuchsdurchführung, Meßprogramm

Die Versuche zur Bestimmung des Brandverhaltens von Stahlbetonplatten im praxisnahen Einbaustand sind in zwei Abschnitte zu unterteilen. Teil 1 wurde im Rahmen der Versuche mit natürlicher Brandlast durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Brandabläufe und der Meßverfahren ist in den Abschnitten 4 und 5 wiedergegeben; als Ergänzung dazu ist nur das im Abschnitt 7.1.3.3 beschriebene Meßprogramm hinzuzufügen. Als Teil 2 sind die 3 Versuche in Anlehnung an DIN 4102 zu betrachten, die fast ausschließlich der Erforschung des Brandverhaltens der Stahlbetonplatten dienen.

7.1.3.1. Beheizung

Natürliche Brände

Angaben über Brandlast und Brandraumabmessungen sind den Tabellen 7.1 und 7.2 sowie dem Abschnitt 4 zu entnehmen.

Versuche mit Heizöl in Anlehnung an DIN 4102

Bei diesen Versuchen stellte sich das Problem, einen Teil der Wohnung (ca. 100 m³) auf Temperaturen in Anlehnung an die Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102 mit Hilfe von 16 Ölbrennern unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603 aufzuheizen. Dazu wurden in die Außenwände in zwei übereinander liegenden Reihen Löcher gestemmt, in die die Brenner eingeführt wurden (s. Bild 7–2). Die Belüftungsverhältnisse wurden so geregelt, daß die Fensteröffnungen mit Hilfe von Promabestplatten verkleinert wurden (siehe Bild 7–3) und durch ein Loch im Fußboden des Brandraums mit Hilfe eines Gebläses Luft zugeführt wurde.

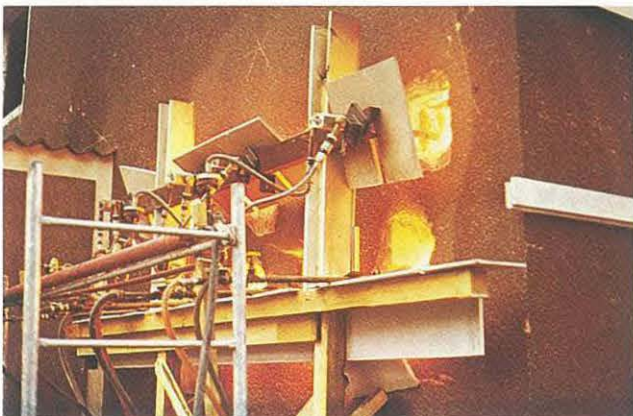


Bild 7–2: Brenneranordnung Versuch 10



Bild 7–3: Regelung der Belüftungsverhältnisse Versuch 10

Die Brandraumtemperaturen wurden über 6 Thermoelemente, die jeweils in Raummitte ca. 10 cm unter der Stahlbetondecke angeordnet, gesteuert.

7.1.3.2. Belastung

Alle Versuche mit natürlicher Brandlast wurden im wesentlichen nur unter Deckeneigengewicht gefahren, während bei den Versuchen nach der Einheitstemperaturkurve eine zusätzliche Verkehrslast in Form von gefüllten Wasserfässern aufgebracht wurde, die etwa der statisch angesetzten Belastung entsprach (s. Bild 7–4).



Bild 7–4: Belastung der Decke – Versuch 10

Die Fässer wurden nahezu gleichmäßig auf der Decke verteilt, nur die Randbereiche blieben zur besseren Rißbeobachtung frei. Unmittelbar vor Versuchsbeginn wurden die Wasserfässer von der Feuerwehr gefüllt.

7.1.3.3 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßte folgende Aufgaben:

Messung der Brandraumtemperaturen mit NiCr-Ni-Thermoelementen

Messung der Temperaturen auf der dem Feuer abgekehrten Seite

Auf den Stahlbetondecken wurden bei den Versuchen 9 – 11 die Oberflächentemperaturen mit Hilfe von angeklebten Fe-Konst.-Thermoelementen gemessen. Zusätzlich wurden mit einem Wanderthermoelement die Temperaturen im Bereich der Risse registriert.

Messung der Stahldehnung an den oben liegenden Bewehrungsstäben im Bereich der Zwischenaufleger bzw. im Bereich der nicht beheizten Deckenfelder zur Bestimmung des Stützmomentenanstiegs bzw. zur Abschätzung von Zwängungskräften in den benachbarten Deckenfeldern.

Messung der Vertikalverformung mit Hilfe dünner Stahl-drähte, die von der jeweiligen Meßstelle zu Rollenmeßgeräten auf der darüber liegenden Geschoßdecke geführt wurden. Die Anordnung der Meßstellen ist den entsprechenden Anlagen zu entnehmen.

Messung der Horizontalverschiebung der Stahlbetondecken mit Hilfe von Theodoliten, die die Verschiebung von fixierten Punkten (Stahlnägeln) an den Außenseiten des Gebäudes registrierten.

Messung von Auflagerkräften mit mechanischen Kraftmeßdosen, die in unter die Decken gestemmte Schlitzte eingebaut wurden (s. Abschnitt 7.2.).

Rißbeobachtung

Der zeitliche Verlauf der Rißbildung wurde während des Versuchs genau registriert, um qualitative Aussagen über das Tragverhalten des Deckensystems zu erhalten.

7.1.4. Darstellung der Meßergebnisse

Ehe die Versuchsergebnisse aufgezeigt werden, sind zunächst einige Angaben über die Genauigkeit dieser Ergebnisse und der damit verbundenen Wertung notwendig, um die Aussagefähigkeit dieses Programms zu verdeutlichen.

Die Temperaturmessungen im Brandraum und an den Bauteilen konnten etwa mit der gleichen Genauigkeit durchgeführt werden wie im Labor. Die Dehnungs- und Verformungsmessungen ließen sich dagegen nur unter erschwerten Bedingungen – nachträgliches Aufbringen von Meßmarken und schwierige Versuchsbeobachtung – durchführen.

Eine quantitative Auswertung wird, speziell bezogen auf das Tragverhalten der Stahlbetondecken unter Brandbeanspruchung, auch dadurch erschwert, daß Randbedingungen wie Auflast, Querabtrag, Einspannungsverhältnisse usw. nicht exakt zu definieren sind. Außerdem sind genaue Angaben über die verwendeten Baustoffe nicht möglich, da nur einige Proben vom Beton und vom Bewehrungsstahl entnommen werden konnten und nachträglich eine Betonzusammensetzung oder Spannungs-Dehnungs-Diagramme aller verwendeten Stähle nicht zu beschaffen waren. Als zusätzlicher Unsicherheitsfaktor ist das unterschiedliche Verhalten des Deckenputzes anzusehen, der zu verschiedenen Zeitpunkten abfiel, teilweise auch nach der Brandbeanspruchung noch haftete (s. Bild 7-5 und 7-6).

Es erscheint daher sinnvoll, die Ergebnisse für eine allgemeine Abschätzung des Tragverhaltens von Stahlbetondecken im gegebenen Einbauzustand unter Brandbeanspruchung hin zu benutzen.

7.1.4.1. Temperaturmessung

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum wurde für die einzelnen Versuche in den entsprechenden Anlagen dargestellt. Es wurden die mittlere Temperatur 10 cm unter der Decke und die mittlere Raumtemperatur aufgetragen.

Bei keinem Versuch bestand die unmittelbare Gefahr des Verlustes des Raumabschlusses oder des Überschreitens von nach DIN 4102 Blatt 2, Ausgabe 1970, zulässigen Temperaturen auf der dem Feuer abgekehrten Seite. Auf eine Wiedergabe von gemessenen Oberflächentemperaturen wird deshalb verzichtet.



Bild 7-5: Decke nach dem Brandversuch



Bild 7-6: Decke während des Brandversuches Wohnung 8

7.1.4.2. Vertikalverformungen

Die gemessenen Vertikalverformungen sind in Form von Biegelinien und als Maximalverformungen in den entsprechenden Anlagen dargestellt.

7.1.4.3. Horizontalverschiebung

Aus versuchstechnischen Gründen konnten an den Geschoßdecken maximal 4 Meßpunkte je Seite beobachtet werden, so daß die Wiedergabe einer horizontalen Verschiebungslinie besonders in den Bereichen der nicht beheizten Deckenfelder nur näherungsweise erfolgen kann. Außerdem sind Ungenauigkeiten der Meßwerte selbst dadurch zu erwarten, daß nicht die Horizontalverschiebung der Stahlbetondecke direkt, sondern am verputzten Mauerwerk in Deckenhöhe gemessen wurde. Das Mauerwerk verdeckte u. U. auch einen möglichen Versatz der Verschiebungslinie im Grenzbereich zwischen beheizten und nicht beheiztem Deckenfeld.

Die in Bild 7-7 schematisch dargestellte Horizontalverschiebung gibt daher nur die Tendenz des Abfalls der Verschiebung zum nicht beheizten Deckenteil hin wieder. Unstetigkeitsstellen in der Verformungslinie können nicht ausgeschlossen werden, es muß im Gegenteil sogar mit ihnen gerechnet werden, wenn die Meßwerte der Dehnung mit den Zwängungskräften im Bereich der nicht beheizten Randstreifen (Abschn. 7.1.4.4) und den Rißbildungen (Abschn. 7.1.4.6) verglichen wird. Die Wertung der Ergebnisse (Abschn. 7.1.6) versucht, die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Resultaten zu klären.

Die gemessenen Verschiebungen zu verschiedenen Zeitpunkten werden in den entsprechenden Anlagen dargestellt und in der folgenden Tabelle 7.4 als Maximalverschiebungen wiedergegeben.

Bei den Versuchen mit natürlicher Brandlast wurden Deckendehnungen von etwa 3 ‰ registriert, wobei die maximalen Dehnungen im allgemeinen in der Mitte der Deckenplatte, die minimale Dehnung im Bereich der angrenzenden, nicht beheizten Deckenstreifen gemessen wurden.

Bei einer Beheizung nach der ETK gemäß DIN 4102 wurden nach einer Brandbeanspruchung von 120 Minuten eine maximale Dehnung von ca. 8 ‰ am Außenrand der Decke und etwa 4,6 ‰ am Innenrand im Anschluß an die nicht beheizten Plattenteile ermittelt.

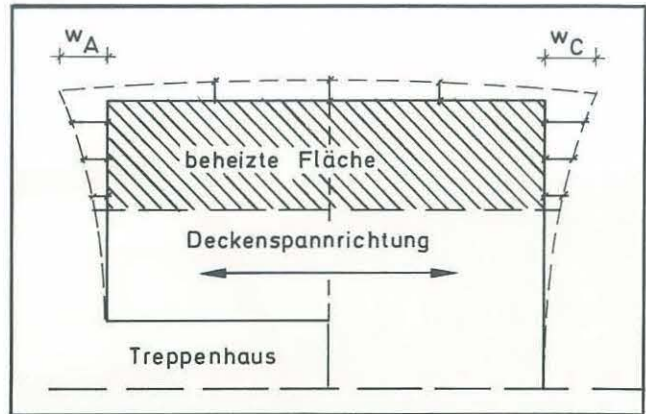


Bild 7-7: Horizontalverschiebung der Platten

Tabelle 7.4: Horizontalverschiebungen

Versuch	Länge der beflamten Deckenteile	Horizontalverschiebung der beflamten Deckenteile [mm]			Zeit ETK [min]
		an Außenwand	maximal	bei angrenzenden nicht beheizten Decken	
2	~ 9,30 m	28,4	31,9	21,8	—
3	~ 9,30 m	25,9	25,9	—	—
4	~ 9,30 m	29,7	31,9	21,8	—
5	~ 9,30 m	25,7	29,3	20,3	—
6	~ 9,30 m	~ 20	~ 32	~ 13	—
9	~ 9,30 m	49,8	47,4 (Mitte)	34,3	100
10	~ 9,30 m	78,2	53,0 (Mitte)	42,2	120
11	~ 9,30 m	44	—	51,5	70

In den folgenden Bildern 7-8, 7-9 und 7-10 sind die Auswirkungen der Horizontalverschiebung am Gebäude zu erkennen. Bild 7-8 zeigt einen Horizontalriß im Treppenhaus in Höhe der Geschoßdecke mit Schrägrissen im Mauerwerk.

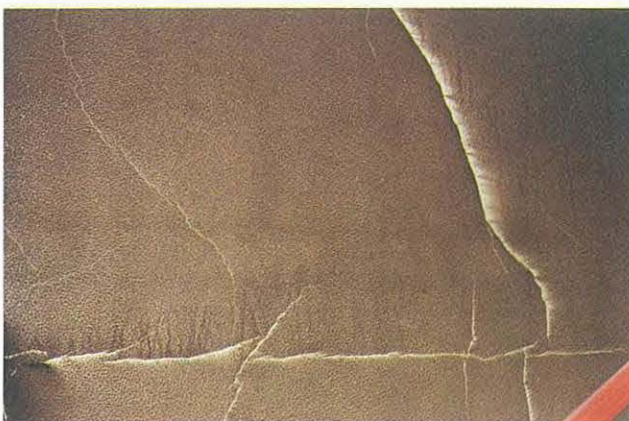


Bild 7-8: Risse in der Treppenhauswand (Vers. 4) Horizontalriß in Höhe der Geschoßdecke

Die Bilder 7-9 und 7-10 zeigen die Verschiebung des Außenmauerwerks in Höhe der Geschoßdecke über dem Fenstersturz (mit deutlich sichtbarer Abnahme der Verschiebung zur Seite hin) bzw. an der Gebäudeufuge.

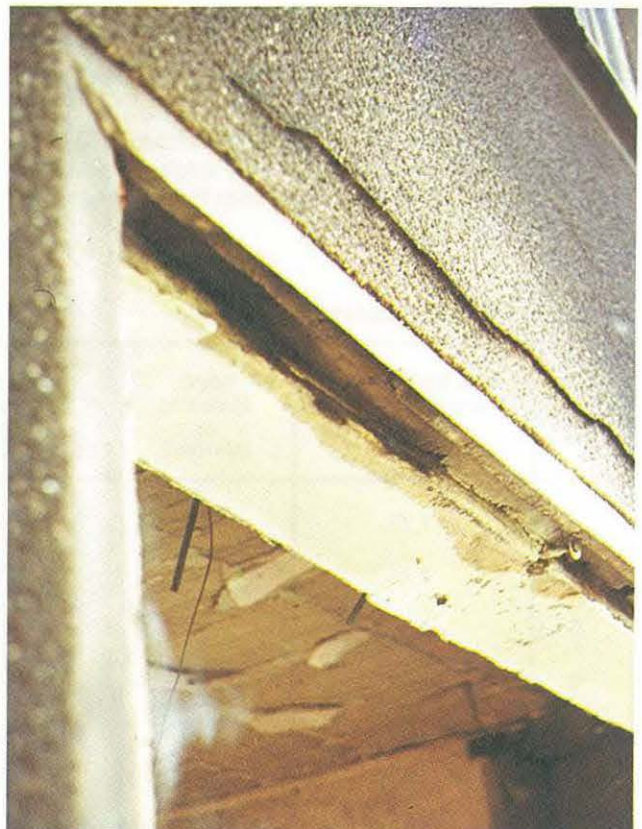


Bild 7-9: Horizontalverschiebung über Fenstersturz

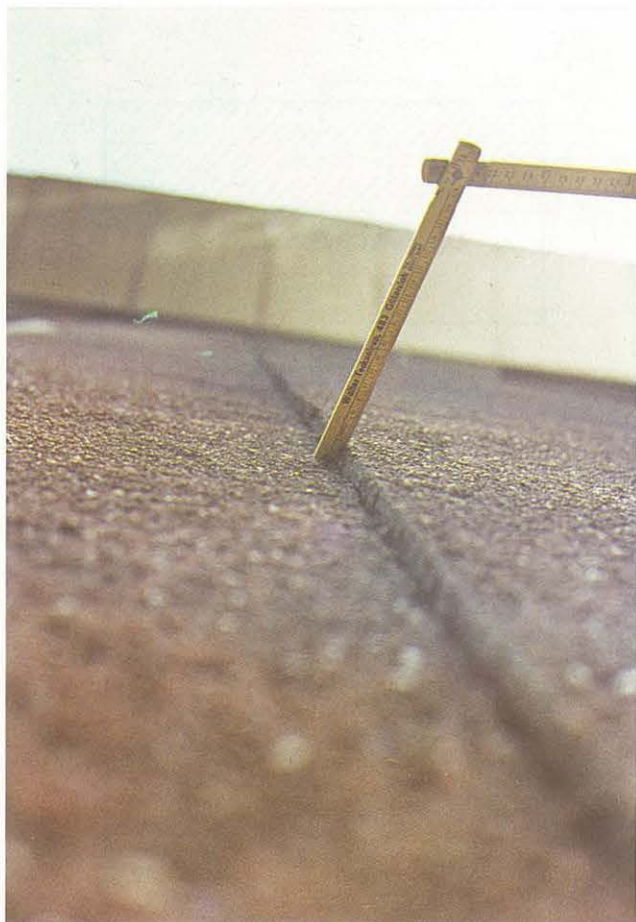


Bild 7-10: Verschiebung an der Gebäudefuge

Die Bilder lassen deutlich erkennen, daß mit der Stahlbetondecke auch das darüber und darunter stehende Mauerwerk verschoben wurde.

7.1.4.4. Dehnungsbehinderung durch angrenzende, nicht beheizte Deckenfelder

In den Grenzbereichen zwischen beheizten und nicht beheizten Deckenteilen bauten sich infolge behinderter Dehnung an den Rändern der beheizten Platten Druckspan-

nungen und an den Rändern der nicht beheizten Platten Zugspannungen auf. Bei den gemessenen Horizontalverschiebungen von $\varepsilon \geq 3 \text{ ‰}$ (s. Abschn. 7.1.4.3) konnten diese Zugspannungen nur von einer vorhandenen Bewehrung aufgenommen werden. Wenn das nicht möglich ist, wird die Dehnungsbehinderung entweder durch die Rißbildung senkrecht zur Spannrichtung in den kalten Plattenbereichen oder durch Längsrisse parallel zur Spannrichtung (Abscheren der beheizten von den kalten Plattenteilen) aufgehoben.

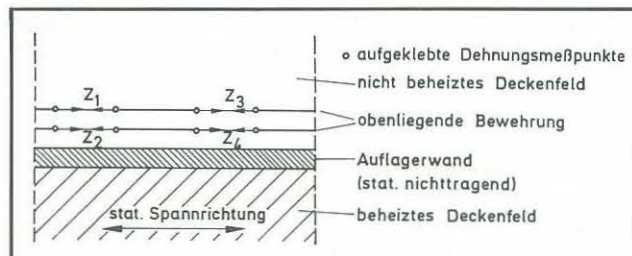


Bild 7-11: Messung der horizontalen Zwängungskräfte

In den Fällen, in denen an den kalten Rändern eine obere Bewehrung lag (Raum 2), wurde die Stahldehnung in einem ca. 30–40 cm breiten Randstreifen (i. a. 3 Bewehrungsstäbe je $Fe \approx 0,28 \text{ cm}^2$) mit Hilfe von Setzdehnungsmessern registriert. Die aus diesen Meßwerten und dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm errechneten Zwängungskräfte, die in Tabelle 7.5 zusammengestellt wurden, lassen natürlich keine genaue quantitative Auswertung zu, da zum einen nur eine geringe Streifenbreite erfaßt wurde und zum anderen der Zwängungsanteil aus der unteren Bewehrung unberücksichtigt blieb, sie geben aber eine Aussage darüber, ob überhaupt die Dehnungsbehinderung wirksam wurde oder ob sie durch Rißbildung aufgehoben wurde.

Alle Meßwerte deuten darauf hin, daß durch die kalten Plattenteile eine Dehnungsbehinderung aufgebaut wurde, da in einigen Fällen sogar die Fließgrenze der Bewehrung überschritten wurde.

Tabelle 7.5: Dehnungsbehinderung

Versuch	max. Stahldehnung am unbeheizten Rand $\varepsilon [‰]$	Stahlspannung σ_s [Mp/cm^2]	Stahlquerschnitt im ca. 30 cm breiten Streifen $Fe [\text{cm}^2]$	Zängungskräfte obere Bewehrung [Mp]	Bemerkungen
1	1,73	3,5	$3 \cdot 0,28 = 0,84$	2,94	
4	3,75	5,3	$3 \cdot 0,28 = 0,84$	4,45	
8	1,38	2,75	$2 \cdot 0,28 = 0,56$	1,54	
9	1,20	2,40	$3 \cdot 0,28 = 0,84$	2,02	Meßstelle Nähe Zwischenauflager (schmaler Plattenteil)
10	2,83	5,3	$3 \cdot 0,28 = 0,84$	4,45	
11	1,30	2,6	$3 \cdot 0,28 = 0,84$	2,18	Nähe Zwischenauflager
	0,75	1,5	0,84	1,26	Feldmitte

7.1.4.5. Änderung der Stützmomente über dem Mittelaufleger

Der Anstieg der Stützmomente über den Zwischenauflägern infolge Temperaturbeanspruchung läßt sich näherungsweise über die Meßwerte der Stahldehnung der oberen Bewehrung unter Berücksichtigung des in Bild 7.1 dargestellten Spannungs-Dehnungs-Diagramms errechnen. Die dabei zu berücksichtigende Ausgangsdehnung der Bewehrung im Kaltzustand kann dagegen nur geschätzt werden.

Der statischen Berechnung wurden zulässige Stahlspannungen von $\sigma_s = 2600 \text{ kpcm}^2$ zugrunde gelegt, die bei der vorhandenen Bewehrung theoretisch auch erreicht wurden. Berücksichtigt man jedoch den vorgegebenen Einbauzustand mit konstruktiven Randeinspannungen und Querabtrag, dann konnten die Stahlspannungen der oberen Bewehrung über dem Zwischenaufleger 1800 kp/cm^2 im Gebrauchszustand kaum überschreiten. Das würde einer Stahldehnung von etwa $\epsilon_s = 0,9 \text{ ‰}$ entsprechen. Unter Zugrundelegung dieses Ausgangswertes sind in der folgenden Tabelle 7.6 die Dehnungen und die daraus ermittelten Zwängungsschnittkräfte zusammengestellt.

Die gemessenen Werte zeigen, daß die Stahlspannungen infolge der Überlagerung von Gebrauchs- und Temperaturzwängungsmomenten die Streckgrenze β_s in Auflagermitte immer erreichten, in Richtung der Plattenecken jedoch teilweise geringer wurden, entsprechend dem Momentenverlauf bei vierseitig gelagerten Platten. Der zeitliche Verlauf der ermittelten größten Momente ist in den entsprechenden Anlagen dargestellt.

Forschungsvorhabens sein. Der Tragmechanismus kann aus den vorher beschriebenen Dehnungs- und Verformungsmessungen oder aus den im Abschnitt 7.2 „Lastabtragung auf nichttragenden Wänden“ ausführlich dargestellten Lastumlagerungen abgeleitet werden, am anschaulichsten läßt er sich jedoch durch die Wiedergabe der Reißbilder erklären, die in den entsprechenden Anlagen dargestellt sind.

Aus einem theoretisch einachsigen Spannungszustand wird infolge der Verformungen aus Gebrauchs- und Temperaturbeanspruchung ein zweiachsiger Spannungszustand, der in der Praxis annähernd zu einer allseitig gelagerten Kreisplatte führt, die im Bereich der Risse an den eingespannten Plattenrändern hängt, wie die folgende Systemskizze (Bild 7-12) verdeutlicht.

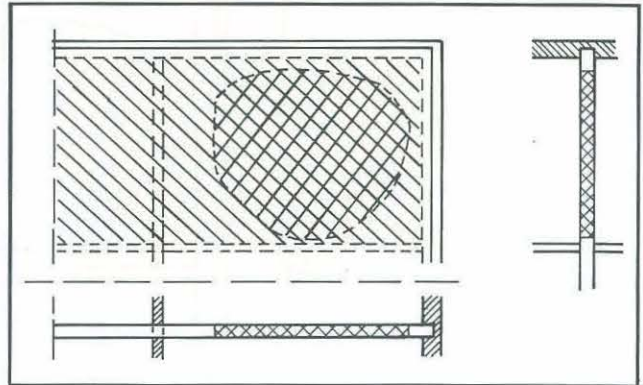


Bild 7-12: Typisches Reißbild einer Platte im beheizten Zustand

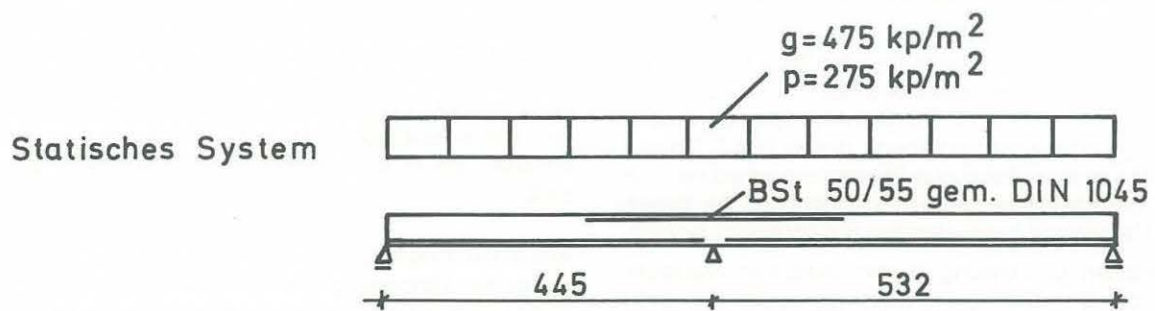
Tabelle 7.6: Zwängungsschnittkräfte

Vers.	Auflager zwischen Räumen a und b	Dehnungsanstieg $\Delta\epsilon$ [‰] (max/min)	Gesamtdehnung ϵ [‰] (max/min)	Stahlspannung σ_s [Mp/cm ²] (max/min)	Spannungsanstieg σ_s [Mp/cm ²] (max/min)	Momentenanstieg ΔM_B [Mpm/m] (max/min)
1	1 und 3	1,80/0,68	2,70/1,58	5,3/3,2	3,5/1,6	3,5/1,6
3	2 und 3	2,03/1,58	2,93/2,48	5,3/5,0	3,5/3,2	2,2/2,0
	1 und 3	3,63/1,45	4,53/2,35	5,3/4,7	3,5/2,9	3,5/2,9
4	1 und 3	2,25/1,80	3,15/2,70	5,3	3,5	3,5
	2 und 3	2,75/2,03	3,65/2,93	5,3	3,5	2,2
5	1 und 3	2,28/1,20	3,18/2,10	5,3/4,2	3,5/2,4	3,5/2,3
	2 und 3	2,55/2,38	3,65/3,28	5,3	3,5	2,2
9	2 und 3	2,20/1,28	3,10/2,18	5,3/4,4	3,5/2,6	2,2/1,7
10	1 und 3	2,30/1,93	3,20/2,83	5,3	3,5	3,5
11	1 und 3	3,55/1,20	4,45/2,10	5,3/4,2	3,5/2,4	3,5/2,3

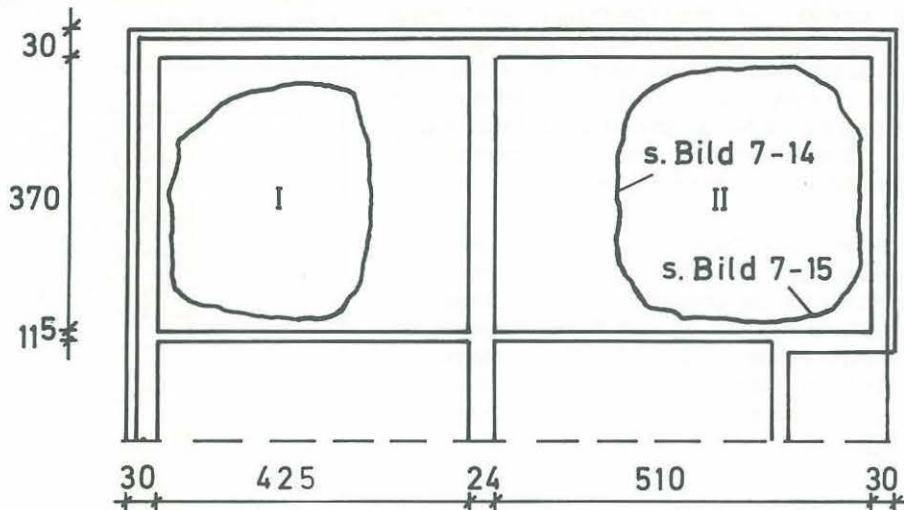
7.1.4.6. Veränderung der Lastabtragung und Darstellung der Tragmechanismen

Die Interpretation der Tragmechanismen von Stahlbetonplatten im gegebenen Einbauzustand unter Brandbeanspruchung sollte die wichtigste Aufgabe im Rahmen dieses

Im folgenden Bild 7-13 werden das statische System und der Einbauzustand mit Hauptrißbildung sowie eine skizzenhafte Darstellung der Momentenverteilung über der Platte im Kaltzustand (Lastfall $g + p$) und unter Brandbeanspruchung (Lastfall $g + p + T$) von Platte 10 wiedergegeben.



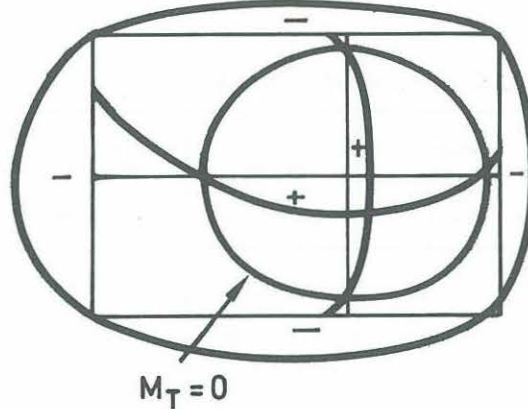
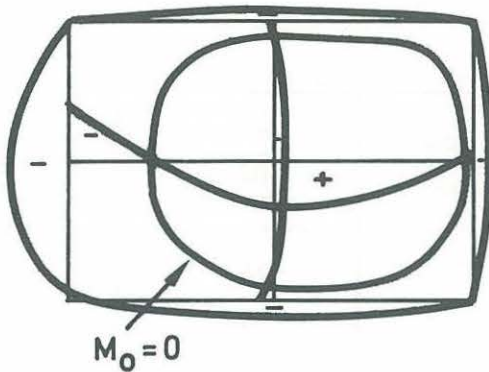
Einbauzustand



Platte II

$M = f(g + p)$

$M = f(g + p + T)$



Tragfähigkeitsverlust $\rightarrow \geq 90 \text{ min}$

Bild 7-13: Stahlbetonplatte ($d = 15 \text{ cm}$) im natürlichen Einbauzustand unter Brandbeanspruchung

Dieses Bild verdeutlicht am vorhandenen System den vorher erklärten Tragmechanismus von Platten im natürlichen Einbauzustand. Der tatsächliche Rißverlauf (s. Bild 7-14 und 7-15) bestätigt ebenfalls diese These.



Bild 7-14: Deckenrisse Versuch 10 am Ende der oberen Bewehrung

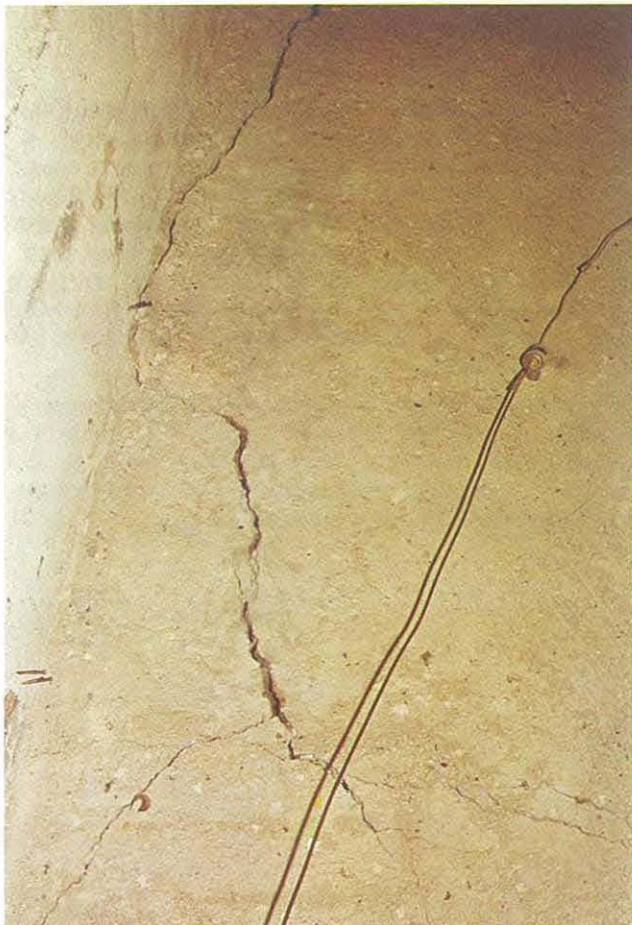


Bild 7-15: Deckenrisse im Versuch 10 nächst der Längswand

Sehr wesentlich bei der Beurteilung der dargestellten Rißbilder ist die Tatsache, daß diese Risse mit Ausnahme von Versuch 11 an der Unterseite der Decke nicht sichtbar

waren. Das bedeutet auch, daß der Verbund zwischen beheizten und nicht beheizten Plattenteilen im allgemeinen durch Längsrisse nicht aufgehoben wurde.

7.1.5. Vergleich der Ergebnisse mit Versuchsergebnissen an Plattenstreifen (Laborversuche)

Um eine Vergleichsmöglichkeit zu den „Lehrter Brandversuchen“ zu erhalten, wurden im Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen eines Forschungsvorhabens [39] zwei Brandversuche an durchlaufenden, 1 m breiten Plattenstreifen durchgeführt. In den folgenden Abschnitten wird eine kurze Beschreibung der Versuche und eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse aus Lehrte und Braunschweig gegeben.

7.1.5.1. Versuchsaufbau und Bewehrungsführung der zwei Vergleichsbauerteile

Es wurden zwei 15 cm dicke, durchlaufende Plattenstreifen mit den Stützweiten $\ell_1 = 4,45$ m und $\ell_2 = 5,32$ m geprüft. In den Systemabmessungen und der Plattendicke entsprachen sie dem „Lehrter System“, Versuch 10 und 11.

Die Vergleichsplatte 1 wurde anhand der vorliegenden statischen Berechnung und der Bewehrungszeichnungen für das „Lehrter Versuchsgebäude“ bewehrt. Diese Bewehrungsführung (DIN 1045, Ausgabe 1959) geht nur von den statischen Erfordernissen aus, Anforderungen im Hinblick auf Brandschutz blieben unberücksichtigt.

Die Vergleichsplatte 2 wurde zwar mit den gleichen Betonstahlmatten wie Vergleichsplatte 1 bewehrt, hinsichtlich der Bewehrungsführung wurden jedoch neuere Erkenntnisse mit herangezogen, die auf Brandversuchen an Stahlbetondurchlaufbalken [43, 44] basierten. Die Stützbewehrung wurde der „Plastischen Momentenlinie“, d. h. der Überlagerung aus Gebrauchsmoment und Temperaturzwängungsmoment, unter Ausnutzung der Fließgrenze der Bewehrung angepaßt. Der Bewehrungsquerschnitt wurde nicht verändert, die Stützbewehrung wurde nur weiter ins Feld geführt.

Die Belastung entsprach in beiden Vergleichsversuchen den Versuchen 10 und 11 des „Lehrter“-Programms.

7.1.5.2. Versuchsergebnisse mit Darstellung der Tragmechanismen

Beide Vergleichsplatten konnten im kalten Zustand und unter Brandbeanspruchung aufgrund der Auflagerbedingungen nur einachsigt abtragen. Es war daher ein balkenähnliches Tragverhalten zu erwarten.

Bei der Vergleichsplatte 1 bildete sich etwa in der 8. Minute am Ende der oberen Bewehrung im kürzeren Feld ein breiter Riß aus, der aus dem 2-Feldträger einen statisch bestimmt gelagerten Gelenkträger machte.

Bei Vergleichsplatte 2 bildeten sich von Versuchsbeginn an unmittelbar über dem Zwischenaufleger mehrere Haarrisse, von denen sich ein Riß bis zur 20. Minute auf ca. 1,0 mm verbreiterte. In der 20. Minute riß die obere Bewehrung, so daß sich vom Tragsystem her zwei statisch bestimmt gelagerte Einfeldplatten bildeten.

Im folgenden Bild 7-16 wird eine skizzenhafte Gegenüberstellung der verschiedenen Tragmechanismen von den Vergleichsplatten und den Platten im Lehrter Brandhaus wiedergegeben.

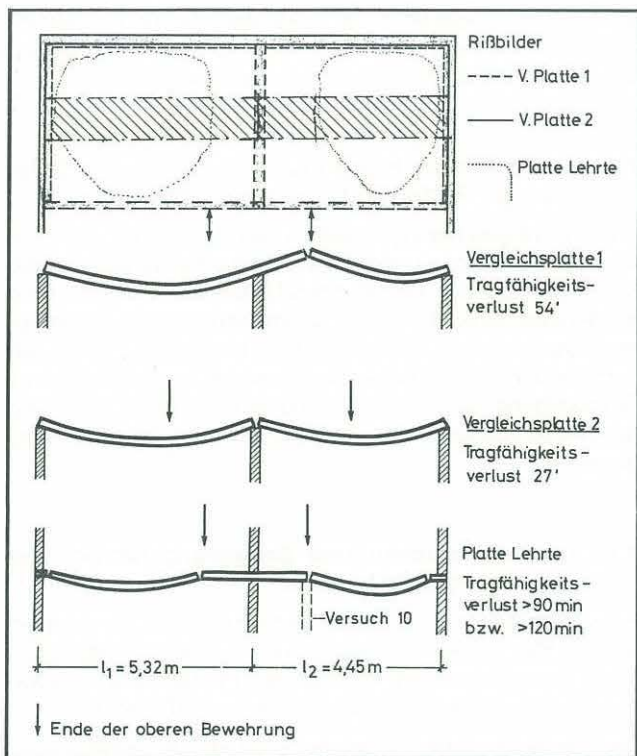


Bild 7-16: Gegenüberstellung der Tragmechanismen

7.1.5.3. Gegenüberstellung des Momentenanstiegs über dem Mittelaufleger

Sehr deutlich läßt sich das unterschiedliche Tragverhalten der Platten an den Meßwerten der Stahldehnung bzw. aus dem daraus errechneten Momentenanstieg ablesen (s. Bild 7-17).

Die langsamere Dehnungszunahme und der damit verbundene langsamere Momentenanstieg bei Versuch 10 gegenüber Versuch 11 ist durch die senkrecht zur Spannrichtung stehende „nichttragende“ 11,5 cm dicke Wand zwischen

Raum 3 und 4 zu erklären, die die Deckenverformung gegenüber Versuch 11 (ohne diese Wand) erheblich behinderte. Die Durchlaufwirkung blieb bei beiden Versuchen gewahrt, obwohl keinerlei Brandschutzmaßnahmen getroffen wurden.

Ganz anders sieht der Momentenanstieg bei den Vergleichsplatten aus. Die den „Lehrer Platten“ entsprechende Vergleichsplatte 1 zeigte in den ersten 5 Minuten einen steilen Momentenanstieg, bis sich am Ende der oberen Bewehrung von der 5. Minute an ein Gelenk ausbildete. Von diesem Zeitpunkt an gingen die Zwängungsmomente auf Null zurück, da sich ein statisch bestimmtes System gebildet hatte, das über dem Zwischenauflager etwa das gleiche Moment aufwies wie die Durchlaufplatte im kalten Zustand.

$$M_B = \frac{(5,32^3 + 4,45^3) \cdot 0,85}{8 \cdot (5,32 + 4,45)} = -2,6 \text{ Mpm}$$

(Zweifeldsystem)

$$M_B = \frac{-0,85 \cdot 1,45^2}{2} - 1,5 \cdot 0,85 \cdot 1,45 = -2,74 \text{ Mpm}$$

(Gelenksystem)

Bei der Vergleichsplatte 2 mit einer nach den Brandschutzvorstellungen verlegten Bewehrung (Verlängerung der Stützbewehrung zur Abdeckung der Zwängungsmomente) konnte sich am Ende der oberen Bewehrung kein Gelenk bilden, da in diesem Bereich die Momente bereits positiv waren. Der steile Momentenanstieg über dem Zwischenauflager führte zum Fließen der Bewehrung, und durch die Bildung eines einzelnen breiten Risses wurde die Bruchdehnung überschritten. Es stellten sich also zwei Einfeldsysteme mit einem $M_B = 0$ ein.

Der wesentlich steilere Momentenanstieg der Vergleichsplatten gegenüber den Versuchen 10 und 11 ist auf die freie Verformbarkeit der Seitenränder zurückzuführen, die bei Platten im baupraktischen Zustand mit konstruktiver seitlicher Auflagerung erheblich behindert wird.

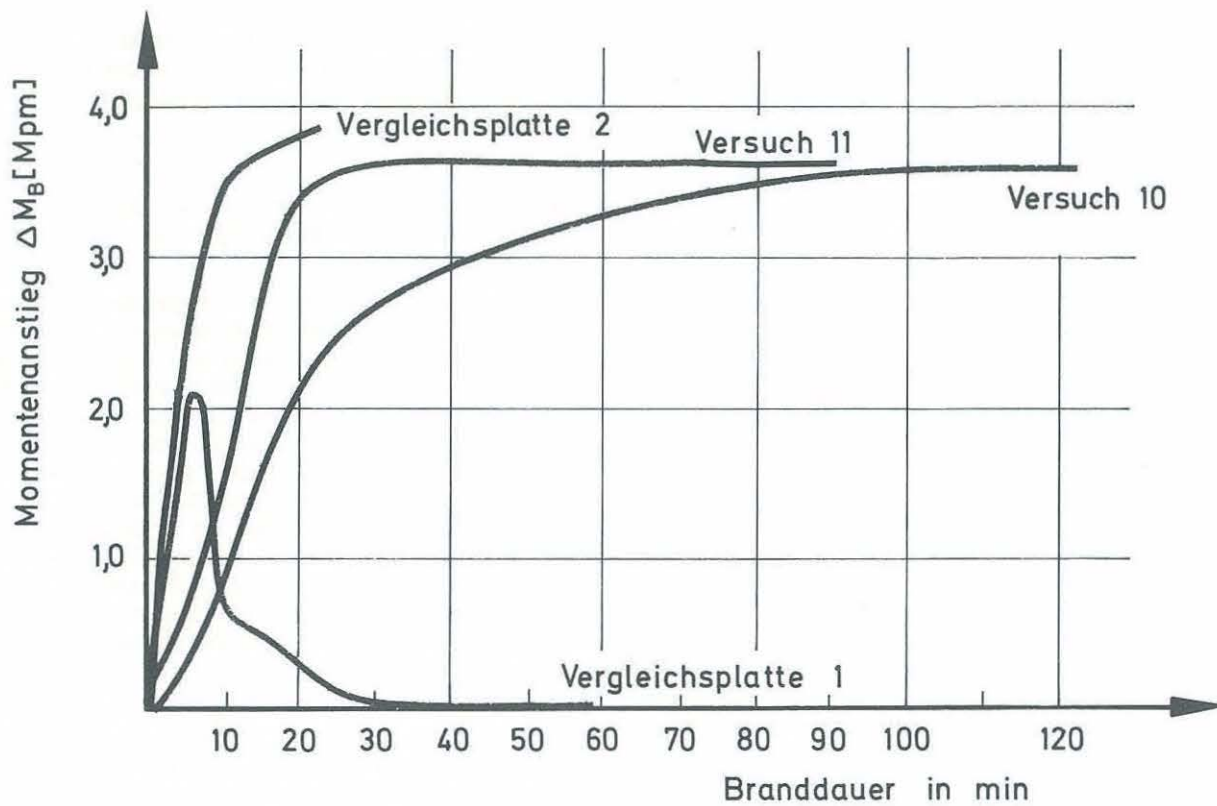
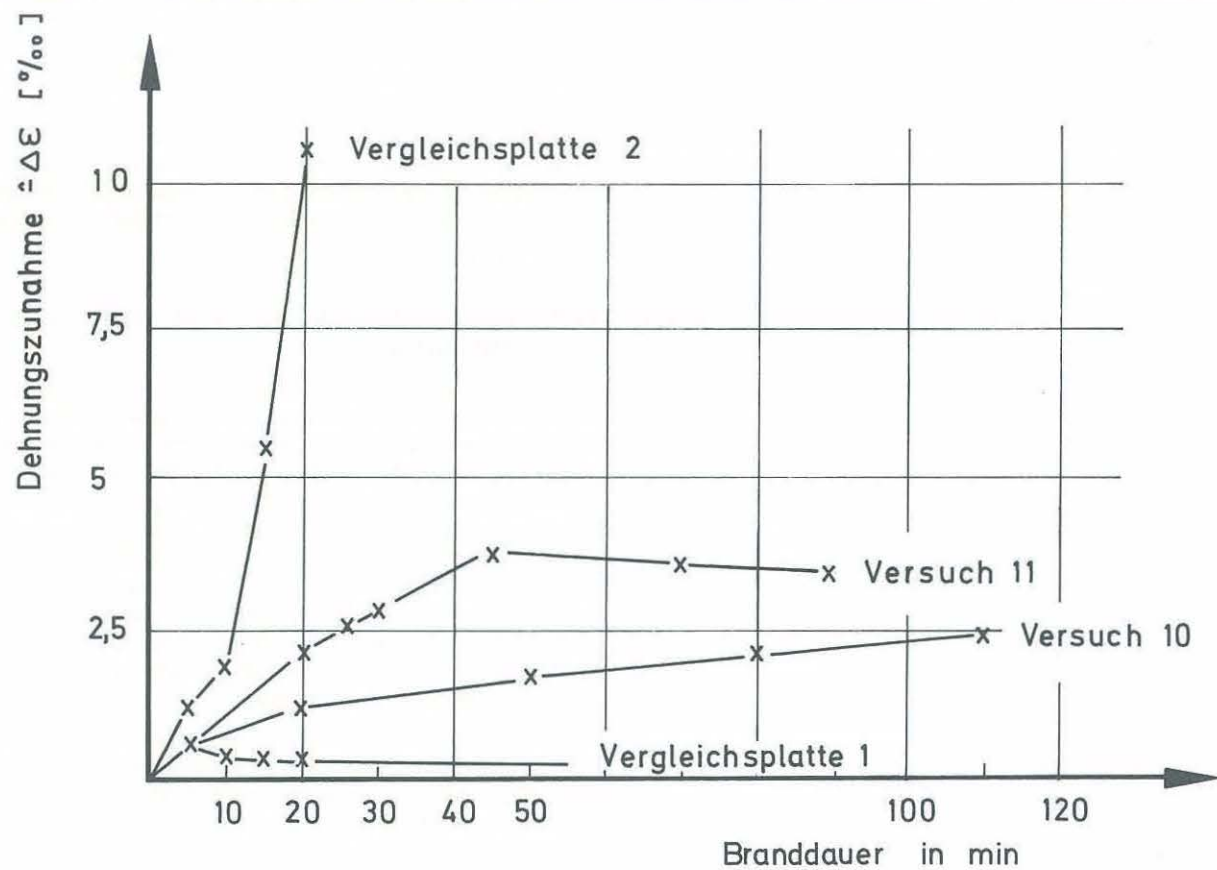


Bild 7-17: Gegenüberstellung von Dehnungszunahme und Momentenanstieg über dem Mittelaugler

7.1.5.4. Gegenüberstellung der Verformungswerte

Bedingt durch den unterschiedlichen Tragmechanismus waren bei den Vergleichsplatten die Vertikalverformungen zu entsprechenden Zeitpunkten erheblich größer als bei den Platten im praxisnahen Einbauzustand (s. Bild 7–18).

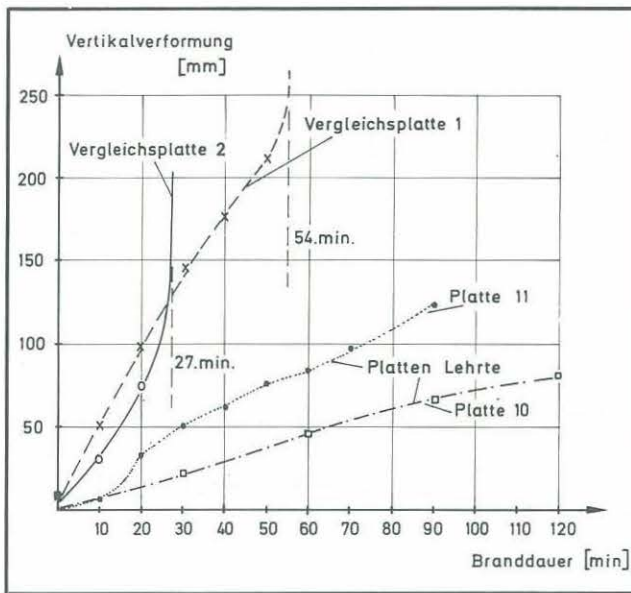


Bild 7–18: Gegenüberstellung der Vertikalverformungen

Auch die Horizontalverschiebungen wurden bei den Platten im „Lehrter Brandhaus“ durch die Auflast in Verbindung mit der Reibung zwischen Mauerwerk und Platte und durch die anschließenden, nicht beheizten Bauteile erheblich behindert. Auf eine genauere Gegenüberstellung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da Ungenauigkeiten infolge der breiten klaffenden Risse nicht auszuschließen sind.

7.1.6. Wertung der Versuchsergebnisse

Keiner der 13 durchgeführten Brandversuche führte zum Verlust der Tragfähigkeit der Stahlbetondecken, obwohl bei der Bewehrung der Decken keine Brandschutzanforderungen berücksichtigt wurden.

Bei einer Beheizung in Anlehnung an DIN 4102 wurden Feuerwiderstandszeiten von > 120 Minuten erreicht, bei natürlichen Bränden konnte auch eine Brandlast von 90 kg Holz/m² die Tragfähigkeit der raumabschließenden Decke nicht beeinträchtigen.

Vergleicht man die im Rahmen von [39] durchgeführten Brandversuche an durchlaufenden Plattenstreifen gleicher bzw. ähnlicher Bewehrungsführung wie das „Lehrer System“, läßt sich feststellen, daß die Platten im praktischen Einbauzustand erheblich längere Feuerwiderstandszeiten erreichen als im „ideal statischen“ Einbauzustand.

Diese Ergebnisse werden bestätigt durch Beobachtungen bei natürlichen Bränden, bei denen Deckeneinstürze erst nach sehr langer Brandbeanspruchung registriert wurden [45, 46], und durch Normversuche an vierseitig gelagerten Platten mit Feuerwiderstandszeiten von mindestens 90 Minuten, in den meisten Fällen von > 120 Minuten [47].

Alle diese Ergebnisse lassen die Vermutung zu, daß Stahlbetonplatten in sehr vielen Fällen ohne besondere Zusatzmaßnahmen im normalen Einbauzustand in die Feuerwiderstandsklasse „F 90“ einzustufen sind, obwohl sie den Konstruktionsrichtlinien von DIN 4102 Blatt 4, Ausgabe 1970, nicht entsprechen.

Neben der Wertung von verschiedenen Einflußkomponenten auf das Tragverhalten von Stahlbetonplatten unter Brandbeanspruchung – Dehnungsbehinderung durch nicht beheizte Plattenstreifen und Momentenanstieg über dem Zwischenaufleger – sollte die Summe aller Beobachtungen in Verbindung mit einfachen Modellvorstellungen und den Ergebnissen anderer Arbeiten zu einfachen Konstruktionsvorschlägen für die Einstufung von Stahlbetondurchlaufplatten im baupraktischen Einbauzustand in die Feuerwiderstandsklasse „F 90“ führen.

7.1.6.1. Dehnungsbehinderung durch nicht beheizte Plattenstreifen

Die in den Abschnitten 7.1.4.3 und 7.1.4.4 dargestellten Ergebnisse – Horizontalverschiebung bzw. Zwängungskräfte – lassen den Schluß zu, daß sich in den beheizten Plattenfeldern durch die kalten Randstreifen hervorgerufene Druckspannungen aufbauten, die die Biegezugspannungen überlagerten. Wie weit der Einfluß der Zwängungsspannungen in die Plattenfelder reichte und wie groß diese Spannungen waren, läßt sich aus den Meßergebnissen nicht ableiten. Hierzu wären umfangreiche theoretische Arbeiten erforderlich, die z. T. bereits in Programmen des SFB 148 (Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen) in Angriff genommen werden.

Vergleicht man die in Tabelle 7.5 angegebenen maximalen Stahldehnungen im Bereich der angrenzenden kalten Plattenstreifen mit den gemessenen Plattendehnungen in den Randbereichen (Spalte 5, Tabelle 7.4), läßt sich eine Ähnlichkeit der Werte insoweit feststellen, daß die Plattendehnungen im Bereich von $2\text{‰} < \epsilon < 5\text{‰}$ und die Stahldehnungen im Bereich von $1,2\text{‰} < \epsilon < 3,75\text{‰}$ liegen.

Die kleine Dehnung von $\epsilon = 0,75\text{‰}$ in Versuch 11 ist vermutlich auf den sehr breiten Deckenriß längs der Auflagerwand zurückzuführen, der den Verbund zwischen beheizten und kalten Plattenteilen erheblich beeinträchtigt hat.

7.1.6.2. Wertung der Änderung von Stützmomenten über den Zwischenauflägern und Wertung der Rißbilder

Die in Abschnitt 7.1.4.5 und 7.1.5.3 angegebenen Momentenverläufe, die sich aus der Überlagerung von Gebrauchs- und Temperaturzwängungsspannungen ergeben, zeigen, daß sich auch im natürlichen Einbauzustand Momente im Bereich des „Plastischen Momentes“ einstellen. Im Unterschied zum Plattenstreifen verlief die Momentenänderung wesentlich langsamer und – bedingt durch die behinderte Vertikalverformung und die konstruktiv vierseitige Auflagerung der Plattenfelder – blieb die Rotationsbeanspruchung des Querschnitts über dem Mittelaufleger wesentlich kleiner. Die Stahldehnungen der oberen Bewehrung blieben unter der Bruch- und noch unter der Gleichmaßdehnung, so daß ein Versagen wie bei der Vergleichsplatte 2 nicht eintreten konnte.

In allen Versuchen stellten sich die größten Risse senkrecht zur Spannrichtung jeweils am Ende der oberen Stützbewehrung bzw. in der Nähe der Ränder, parallel zur Spannrichtung am Ende der konstruktiven Randbewehrung oder unmittelbar am Wandanschnitt ein (s. Bild 7–19 und 7–23). Das beweist, daß in beiden Richtungen über den tragenden und über den „nichttragenden“ Zwischenauflägern Zwängungsmomente aufgebaut wurden, die bei Überlagerung mit den Gebrauchsmomenten durch die vorhandene Bewehrung bzw. durch die Zugfestigkeit des Betons nicht mehr abgedeckt werden konnten.



Bild 7-19: Riß parallel zur Spannrichtung
Versuch 11

Die These des Momentenanstiegs in beiden Richtungen wird untermauert durch die Messung des Lastanstiegs über „nichttragenden“ Wänden parallel zur Spannrichtung (s. Abschnitt 7.2 „Lastabtragung auf nichttragenden Wänden“).

Der zeitliche Verlauf der Rißbildung (s. entsprechende Anlagen) stimmt in der Tendenz mit Normversuchen an durchlaufenden Plattenstreifen überein, bei denen sich ebenfalls bis zur 30. Minute die systemverändernden Risse einstellen. Die Unterschiede in der Art der Systemveränderung sind jedoch deutlich zu erkennen.

Bei durchlaufenden Plattenstreifen stellen sich nach der Rißbildung Gelenksysteme ein, bei denen die Stützweite des angehängten Plattenstreifens wesentlich kleiner als im „Kaltzustand“ ist (s. auch Bild 7-16). Die untersuchten Platten im natürlichen Einbauzustand lassen sich nach der Rißbildung als allseitig gelenkig gelagerte rechteck- bzw. kreisähnliche Plattenteile darstellen mit erheblich verkürzten Stützweiten gegenüber dem „Kaltzustand“. Die Versuche haben auch gezeigt, daß eine vorhandene Randbewehrung die „Sollrißstelle“ an das Ende dieser vorhandenen Bewehrung schiebt, während ohne Randbewehrung der Riß unmittelbar am Wandanschnitt beginnt. Diese Beobachtungen fließen auch in die in Abschnitt 7.1.6.3 erarbeiteten Modellvorstellungen ein.

Neben dem Rißverlauf hat auch die Rißbreite Einfluß auf das Tragverhalten und besonders auf die raumabschließende

Funktion der Decke. In allen Versuchen mit natürlicher Brandlast wurden auf den – allerdings unbelasteten Decken – Rißbreiten von 2 mm nicht überschritten. Bei den Versuchen 9–11 wurden dagegen besonders am Ende der Stützbewehrung Rißbreiten von mehr als 15 mm registriert (s. Bild 7-20 und 7-21).



Bild 7-20: Riß am Ende der oberen Bewehrung



Bild 7-21: Riß am Ende der oberen Bewehrung (Detail)

Die Tragfähigkeit blieb jedoch ebenso wie die raumabschließende Funktion in allen Fällen erhalten, da keine durchgehenden Risse beobachtet wurden. Der in Bild 7-21 dargestellte Plattenversatz im Rißbereich war durch eine Längsaufspaltung der Stahlbetondecke möglich.

7.1.7. Modellvorstellungen über Tragmechanismen

Aus der Gegenüberstellung der in Abschnitt 7.1.5.2 beschriebenen Tragmechanismen und den im vorigen Abschnitt ausgewerteten Rißbildern lassen sich auch statische Näherungslösungen ableiten, die zunächst an einer einachsig gespannten Einfelddecke in Anlehnung an das System „Lehrte“ dargestellt werden.

Die Modellvorstellung geht davon aus, daß die Querbewehrung im Gegensatz zur statischen Annahme im Brandfall mitträgt, daß außerdem die brandschutztechnisch maßgeblichen Stützweiten infolge Randeinspannung kleiner sind als die statischen Stützweiten.

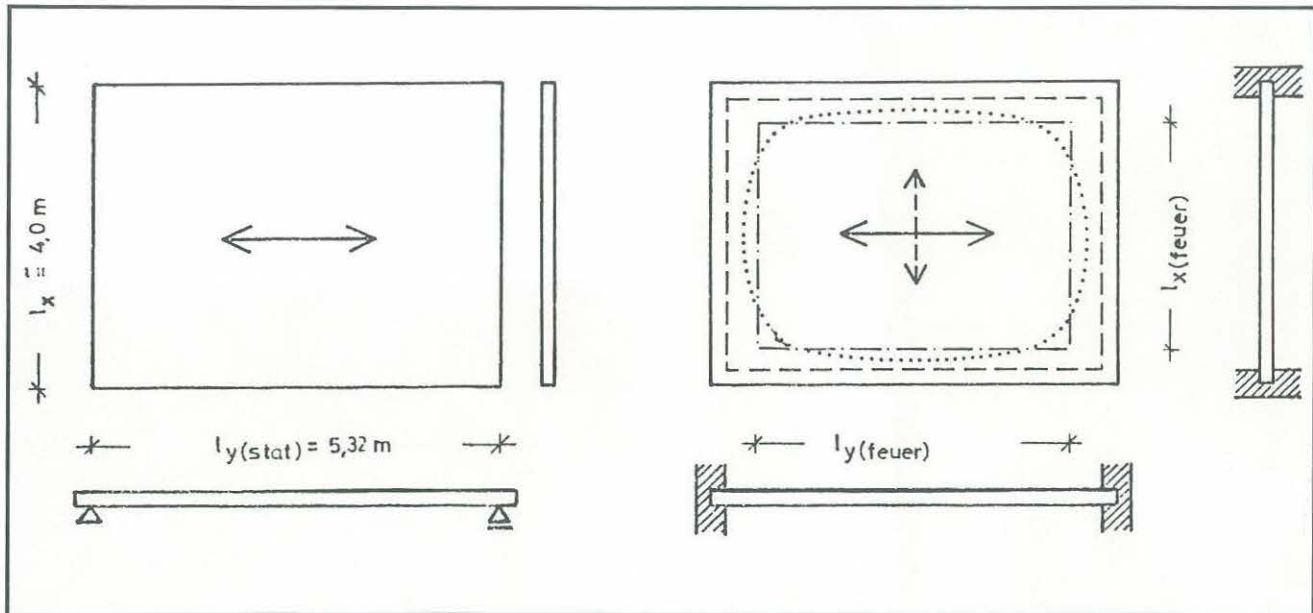


Bild 7-22: Statisches Modell einer allseits gelagerten Platte

Plattenstreifen

statisches Moment:

$$M_y = q \cdot \ell_y^2(\text{stat})/8$$

erforderl. Bewehrung:

$$F_{e_y} = \frac{k_e}{h} \cdot M_y$$

$$F_{e_x} = 1/5 F_{e_y}$$

Bei angenommenen Werten von $h = 13 \text{ cm}$ und $k_e = 39$ sowie $\ell_y = 5,32$ und $\ell_x = 4,00$ ergibt sich

$$F_{e_y} = 3 \cdot M_y = 10,6 \cdot q$$

$$F_{e_x} = 1/5 F_{e_y} = 2,1 \cdot q$$

$$F_{e_x \text{ vorh}} = 2,1 \cdot q$$

$$F_{e_y \text{ vorh}} = 10,6 \cdot q$$

Eine Gegenüberstellung der Werte zeigt, daß beim Ansatz der Modellvorstellung die vorhandene Bewehrung bei weitem nicht ausgenutzt wird, die Hauptbewehrung in y-Richtung nur zu etwa 8 %, die Querbewehrung etwa zu 80 %.

vierseitig gelagerte Platte

Stützweiten:

$$\ell_y(\text{Feuer}) \cong 0,75 \ell_y(\text{stat}) \sim 4,0 \text{ m}$$

$$\ell_x(\text{Feuer}) \cong 0,75 \ell_x(\text{stat}) \sim 3,0 \text{ m}$$

$$\ell_y(\text{Feuer}) / \ell_x(\text{Feuer}) \cong 1,33$$

Momente:

Es darf mit drillsteifen Ecken gerechnet werden, da die abhebenden Kräfte durch den Anschluß an die eingespannten Randstreifen behindert werden.

$$M_x = q \cdot \ell_x^2(\text{Feuer})/16,2 = 0,56 q$$

$$M_y = q \cdot \ell_y^2(\text{Feuer})/31,4 = 0,29 q$$

erforderliche Bewehrung:

$$F_{e_x \text{ erf}} \cong 3 \cdot 0,56 q = 1,86 \cdot q$$

$$F_{e_y \text{ erf}} \cong 3 \cdot 0,29 q = 0,87 \cdot q$$

Bezogen auf die Fließgrenze ergeben sich Ausnutzungsfaktoren mit dazugehörigen kritischen Stahltemperaturen – die Temperatur, bei der die Fließgrenze des Stahls auf den Wert der effektiv wirkenden Stahlspannung abfällt – für die Bewehrung

$$\text{in y-Richtung: } \sigma_e/\beta_s \cong 0,04 \rightarrow T_{\text{krit}} \sim 750^\circ\text{C.}$$

$$\text{in x-Richtung: } \sigma_e/\beta_s \cong 0,45 \rightarrow T_{\text{krit}} \sim 550^\circ\text{C.}$$

Nach 90 Minuten Normbrandbeanspruchung werden nach [40] am Betonstahl bei einer Betondeckung von $\bar{u} = 1,0$ cm Temperaturen von $630 - 700^\circ\text{C}$, bei $\bar{u} = 1,5$ cm Temperaturen im Bereich von $580 - 650^\circ\text{C}$ erreicht, Temperaturen, die bei systembedingt geringerer Spannungsausnutzung des Stahls nicht zum Versagen führen, d. h. es ist bei diesem Seitenverhältnis damit zu rechnen, daß eine mit minimaler Betondeckung hergestellte, vierseitig gelagerte, theoretisch einachsig gespannte Platte mit entsprechenden Randbedingungen in die Feuerwiderstandsklasse „F 90“ einzustufen ist, wenn sichergestellt werden kann, daß neben der Tragfähigkeit auch der Raumabschluß erhalten bleibt.

Diese Modellbetrachtung läßt sich für verschiedene Seitenverhältnisse durchführen, sie soll jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlich behandelt werden.

Die Vergleichsrechnungen ergaben für Seitenverhältnisse $1,33 > \ell_y/\ell_x \geq 1,0$ keine erhöhten Anforderungen gegenüber DIN 1045, bei Seitenverhältnissen $1,0 > \ell_y/\ell_x \geq 0,5$ eine erforderliche Betonüberdeckung von $\bar{u} \geq 1,5$ cm, vorausgesetzt jeweils eine konstruktive Randeinspannung aller Ränder gemäß DIN 1045 Zi. 20.1.6.2. und 20.1.6.3. und eine Auflast, die in der Lage ist, diese Einspannkräfte zu erzeugen.

Nach [41] wird durch die konstruktive Randeinspannung von einachsig gespannten **Plattenstreifen** bereits eine Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer von mehr als 20 Minuten erreicht (s. auch Bild 7–23).

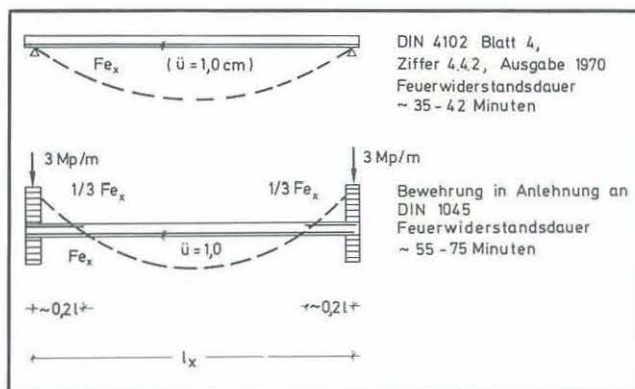


Bild 7–23: Einfluß der Randeinspannung auf die Feuerwiderstandsdauer

Aus dieser Tatsache ist zu folgern, daß auch unendlich breite, einachsig gespannte Platten bei konstruktiver Randeinspannung mit geringerer Betonüberdeckung ausgeführt werden dürfen, als die z. Z. gültige Norm DIN 4102 fordert. Vergleichsberechnungen ergaben, daß eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten bei Betonüberdeckungen von 2,0–2,5 cm erreicht wird.

In den vorangegangenen Absätzen wurden die Werte für die Betonüberdeckung jeweils auf die Oberfläche der Bewehrung bezogen, um einen direkten Vergleich mit DIN 1045 zu ermöglichen. Dabei wurde als Längsstabquerschnitt $\varnothing 5$ mm Durchmesser zugrunde gelegt, alle Stäbe mit größerem Durchmesser weisen eine größere Betondeckung, bezogen auf die Stabachse, auf und sind brandschutztechnisch günstiger zu beurteilen.

7.1.8. Konstruktionsvorschläge für Durchlaufplatten

Bereits anhand der wenigen Versuche lassen sich Vorschläge zur Bewehrungsführung an einachsig gespannten, durchlaufenden Platten im natürlichen Einbauszustand erarbeiten, wobei zu unterscheiden ist zwischen Plattensystemen ohne konstruktiven Querabtrag – z. B. Gebäude mit Zwischenwänden, die eine Vertikalverformung der Decke zulassen – und Plattensystemen mit konstruktivem Querabtrag, wie sie häufig im Wohnhausbau mit massiven Zwischenwänden vorkommen.

7.1.8.1. Einachsig gespannte Platten ohne konstruktiven Querabtrag

Für Platten ohne konstruktiven Querabtrag bzw. mit einem Seitenverhältnis (Abstand der unterstützenden „nichttragenden Wände“/Stützweite) $\ell_x/\ell_y > 2$ gelten die Konstruktionsbestimmungen für durchlaufende Plattenstreifen, u. a. Verlängerung der rechnerischen Stützbewehrung um $0,2 \ell$ und durchgehende obere Feldbewehrung von $0,2 \cdot F_{e\text{Stütz}}$, die auf die Verlängerung angerechnet werden darf.

Die in Abschnitt 7.1.6.1 angeführten Vergünstigungen sollten nur im Einzelfall berücksichtigt, ansonsten jedoch als zusätzliche Sicherheit beibehalten werden.

7.1.8.2. Einachsig gespannte Platten mit konstruktivem Querabtrag

Als Platten mit konstruktivem Querabtrag werden im Rahmen dieser Arbeit alle einachsig gespannten Platten betrachtet, bei denen der Abstand der parallel zur Spannrichtung stehenden „nichttragenden“ Wände kleiner als die doppelte Stützweite ist. Voraussetzung ist natürlich auch, daß diese „nichttragenden“ Wände in der Lage sind, Deckenverformungen zu behindern.

In den Modellbetrachtungen (Abschnitt 7.1.6.3) wurde nachgewiesen, daß eine allseitig konstruktiv eingespannte, einachsig gerechnete Platte – Abstand der „nichttragenden“ Wände $\ell_x/\text{Stützweite } \ell_y = 0,75$ – ohne Zusatzmaßnahmen eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erreicht. Vorausgesetzt wurde nur eine Randbewehrung im Sinne von DIN 1045, Ziffer 20.1.6.2 und 20.1.6.3 und Tragstöße der Querbewehrung.

Unter den gleichen Gesichtspunkten wurde eine Vergleichsberechnung für ein Stützweitenverhältnis von $\sim 2,0$ durchgeführt, die eine Feuerwiderstandsdauer von ≥ 90 Minuten bei einer Betondeckung der Hauptbewehrung von $u \approx 1,8$ cm (bezogen auf die Achse der Stahleinlagen) ergab.

Ein Deckensystem mit echter Durchlaufwirkung wird sich wesentlich günstiger verhalten, da zumindest an einer Seite die obere Bewehrung weiter ins Feld geführt wird als bei einer konstruktiven Einspannung, wie die Rißbildbetrachtung der „Lehrer Versuche“ (Abschnitt 7.1.6.2 und entsprechende Anlagen) deutlich zeigten.

Berücksichtigt man weiterhin, daß alle Deckenplatten in Lehrte, ohne Tragstoß der Querbewehrung und an 2 bzw. 3 Seiten ohne Randbewehrung ausgeführt, Feuerwiderstandszeiten von mehr als 90 Minuten erreichten, ist anzunehmen, daß die folgenden Konstruktionsvorschläge für eine Einstufung in die Feuerwiderstandsklasse „F 90“ auf der sicheren Seite liegen:

Tabelle 7.7: Konstruktionsvorschläge

	Abstand der „nichttragenden“ Wände $l_x/\text{Stützweite } l_y$	
	$\leq 1,0$	$\leq 2,0$
Betondeckung der Feldbewehrung	Gem. DIN 1045 $\Delta \ddot{u} \geq 1,0 \text{ cm}$	u 1,8 cm (Achsabstand) $\Delta \ddot{u} \geq 1,5 \text{ cm}$
Querbewehrung	Mit Tragstoß verlegen (Verwendung von ZQ-Matten)	
Ranbewehrung	gemäß DIN 1045 Zi 20.1.6.2. und Zi 20.1.6.3.	
Auflast ¹⁾	≥ 1 Geschoß	

1) Mit dieser Forderung soll ein Minimum an Deckenaufrost gewährleistet werden, damit zumindest eine Teileinspannung an den Rändern möglich ist.

7.1.9. Zusammenfassung

In diesem Teilbericht wurde das Tragverhalten von Stahlbetondecken bei Brandbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung des vorhandenen Einbauszustands untersucht und dem Tragverhalten von durchlaufenden Plattenstreifen, die Grundlage der Konstruktionsrichtlinien nach dem Entwurf von DIN 4102 Teil 4, Ausgabe 1978, sind, gegenübergestellt.

In Abschnitt 7.1.2 und 7.1.3 dieses Berichts wurden Versuchsprogramm und -durchführung beschrieben, während in Abschnitt 7.1.4 und 7.1.5 die Versuchsergebnisse einschließlich des Vergleichs mit Versuchsergebnissen an Plattenstreifen präsentiert werden. Abschnitt 7.1.6 schließlich gibt eine Auswertung der Ergebnisse mit einem Vorschlag zur praktischen Verwendung der gefundenen Konstruktionsprinzipien.

Es wäre sicherlich verfrüht, diese Ergebnisse bereits jetzt in DIN 4102 zu integrieren, da zu viele Parameter bei einer allgemeingültigen Betrachtung zu berücksichtigen sind. Für die Beurteilung des Einzelfalles können der Untersuchung jedoch wertvolle Hinweise entnommen werden.

Mit diesem Forschungsprogramm ist der Komplex „Stahlbetondecken im gegebenen Einbauszustand“ mit Sicherheit noch nicht abgeschlossen. Neben der in Abschnitt 7.1.6.2 angeschnittenen Reißbildung sollten insbesondere der Einfluß von Tragstoßen der Querbewehrung und unterschiedliche Stützweitenverhältnisse näher untersucht werden. Erst wenn diese Fragen geklärt sind, besteht die Möglichkeit, das Tragverhalten von Stahlbetondecken unter Brandbeanspruchung genauer und möglicherweise wesentlich wirtschaftlicher zu beurteilen.

7.2. Lastabtragung auf nichttragende Wände

7.2.1. Allgemeines

In der Normung nach DIN 4102 geht man von dem nicht voll befriedigenden Zustand aus, bei der Klassifizierung von

theoretisch nichttragenden Wänden Ergebnisse von Brandversuchen an unbelasteten Wänden zugrunde zu legen, obwohl bekannt ist, daß in sehr vielen Fällen bereits im Gebrauchszustand und erst recht im Brandfall erhebliche Zwängungskräfte auf die Wand einwirken können, die u. a. durch Behinderung der Deckenverformungen hervorgerufen werden.

Diese Zwängungskräfte können in einigen Fällen zu einem vorzeitigen Versagen der Wandkonstruktion führen, die dann die erwartete brandschutztechnische Funktion – z. B. Wahrung des Raumabschlusses – nicht mehr erfüllen kann.

Die Konsequenz von der prüftechnischen Seite her wäre, „nichttragende Wände“ grundsätzlich unter Belastung zu prüfen, um das vorhandene Sicherheitsrisiko besser abzudecken.

Die Größe dieser Zwängungskräfte ist jedoch systemabhängig unterschiedlich. Die Stützweitenverhältnisse der darüberliegenden Decke, die Belastung und die Einspannungsgrade werden die Zwängungskräfte ebenso beeinflussen wie die Stellung der Wand und die Ausbildung des Anschlusses an die Decke. Ein verschieblicher Wand-Decken-Anschluß kann unter Umständen die auftretenden Deckenverformungen aufnehmen, ohne Zwängungskräfte in die Wand zu leiten, andererseits sind bei großen Deckenstützweiten so große Verformungen infolge Temperaturbelastung zu erwarten, daß auch ein verschieblicher Deckenanschluß, der 3–4 cm Durchbiegung zuläßt, nicht ausreicht, um Zwängungskräfte zu verhindern. Außer den vorher beschriebenen Faktoren wird auch die Wandsteifigkeit die Größe der Zwängungskräfte beeinflussen.

Es muß aber auch die Frage gestellt werden, ob prüftechnisch der ungünstigste Fall erfaßt werden soll, um eine allgemeine Verwendbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, oder ob aus wirtschaftlichen Gründen ein annehmbarer Mittelwert für die Belastung bzw. für die zulässige Verformung gewählt werden soll, der das Risiko gegenüber der bisherigen Praxis erheblich mindert, Extremfälle aber nicht erfaßt.

Die in Lehrte durchgeführten Versuche sollten Anhaltswerte darüber liefern, in welcher Größenordnung im vorhandenen Gebäude Zwängungskräfte auf nichttragend angenommene Mauerwerkswände zu erwarten sind und in welcher Relation sie zu den Deckenverformungen im angrenzenden beheizten Raum stehen.

7.2.2. Versuchsprogramm „Lastabtragung“

In der folgenden Tabelle 7.8 sind alle Versuche, bei denen die Lastabtragung auf die „nichttragenden Wände“ gemessen wurde, aufgeführt. Neben der allgemeinen Versuchsbezeichnung und dem Brandraum wurden insbesondere die Stellung der Wand zur Deckenspannrichtung, die Auflast aus darüberliegenden Geschossen und die versuchstechnisch bedingte Vorlast angegeben.

Die durchgeführten Versuche geben häufig in der Praxis des Wohnungsbaus und des Baues von Verwaltungs- und Bürogebäuden auftretende Fälle wieder und sind aus diesem Grunde als praxisnahe Anhaltswerte zu betrachten.

Tabelle 7.8: Versuchsprogramm „Lastabtragung auf nichttragende Wände im Brandfall“

Versuch Nr.	Brandraum	Stellung der nichttragenden Wand zwischen	Wanddicke (cm)	Auflast	Brandlast im angrenzenden Raum	Vorlast im Einbauzustand
02	Wohnung 1 Raum 4	Raum 3/4 \perp ¹⁾	11,5	3 Geschosse	30 kg/m ² Holzkrippen	0,75 Mp
1	Wohnung 2 Raum 1	Raum 1/2 \parallel ¹⁾	11,5	3 Geschosse	30 kg/m ² Holzkrippen	0,3 Mp
3	Wohnung 11 alle Räume	Wohnung 1/12 \parallel	24	1 Geschoß	Wohnmobiliar	1,4 Mp
4	Wohnung 2 alle Räume	Wohnung 2/1 \parallel	24	3 Geschosse	30 kg/m ² Holzkrippen	1,1 Mp
6	Wohnung 3+7 alle Räume W3	Wohnung 3/4 \parallel	24	3 Geschosse	60 kg/m ² Holzkrippen	1,5 Mp
8	Wohnung 8+12 alle Räume W 8	Wohnung 7/8 \parallel	24	2 Geschosse	90 kg/m ² Holzkrippen	3,2 Mp
11	Wohnung 4 Raum 1, 3, 4	Raum 1/2 \parallel	11,5	— ²⁾	Heizöl (ETK-Kurve)	3,0 Mp

1) \parallel, \perp parallel bzw. senkrecht zur Deckenspannrichtung.

2) 11,5 cm Wand im darüberliegenden Geschoß wurde aus versuchstechnischen Gründen abgetragen.

7.2.3. Versuchsaufbau

Unmittelbar unter der Stahlbetondecke wurde jeweils eine Außenwand des Brandraumes auf einer Länge von 2,00 m

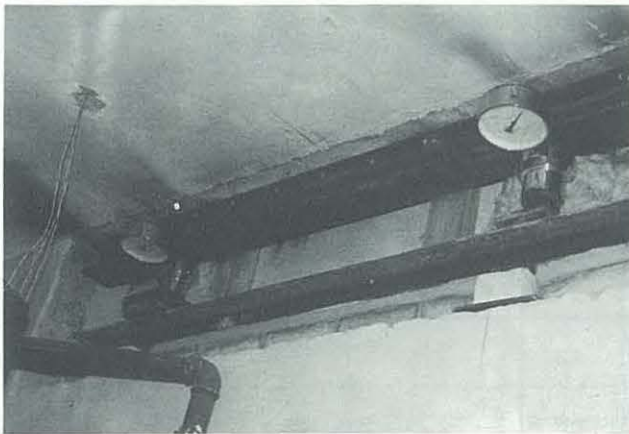


Bild 7–22: Messung der Lastumlagerung auf Wände

etwa 0,45 m hoch ausgestemmt. In diese Öffnungen wurden zwischen zwei Stahlträger (IPB 100) zwei mechanische Kraftmeßdosen eingebaut, die von der Feuerseite mit Hilfe von 2 × 25 mm dicken Promabestplatten und Mineralfaser-verstopfung vor unzulässiger Aufheizung geschützt wurden. Der Versuchsaufbau ist in Bild 7–22 dargestellt.

Die Kraftmeßdosen wurden so eingebaut, daß bereits vor Versuchsbeginn eine Vorlast aufgebracht war, die mit Sicherheit ausschließen sollte, daß freie Vertikalverschiebungen der Decke möglich waren, die aber auch eine in der Praxis bereits vorhandene Belastung dieser Wände im „Kaltzustand“ wiedergibt.

Der Versuchsaufbau läßt keine exakte Abgrenzung der Lastanteile zu, die von den Kraftmeßdosen bzw. von den angrenzenden Wandteilen aufgenommen werden. Für die weitere Auswertung wird daher das in Bild 7–23 dargestellte System zugrunde gelegt, das in Näherung der tatsächlichen Lastverteilung entsprechen wird.

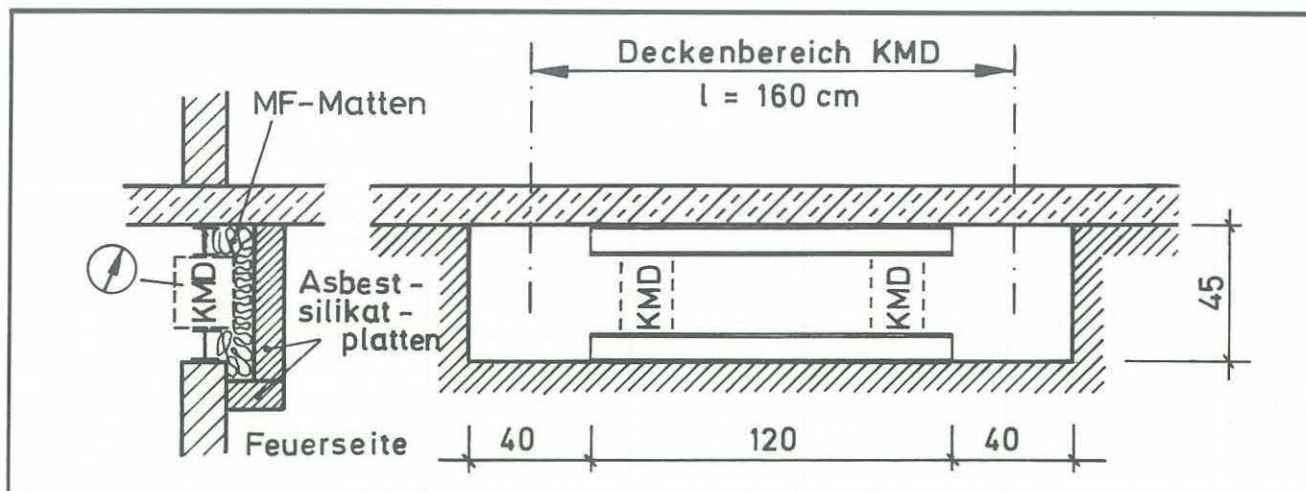


Bild 7-23: Systemskizze Versuchsaufbau

Der gemessene Lastanstieg wird nach Bild 7-23 auf einen Deckenstreifen von 1,60 m Breite bezogen. Für die Auswertung der Meßergebnisse wurde bei einigen Versuchen ein Vergleich mit der Vertikalverformung des angrenzenden beheizten Deckenfeldes vorgenommen, der Hinweise auf die Größenordnung der durch die Wand behinderten Deckendurchbiegung geben kann. In den Diagrammen werden jeweils die zugehörigen Werte von Brandraumtemperaturen, Lastanstieg und Vertikalverformungen – soweit sie gemessen werden konnten – aufgetragen.

- b) Die Anzahl der über der Wand liegenden Geschosse hat einen wesentlich größeren Einfluß auf den Lastanstieg als Brandlast und Branddauer.
- c) Der zeitliche Verlauf des Lastanstiegs ist – abgesehen von Versuch 11 – identisch mit dem zeitlichen Verlauf des Anwachsens der Deckenverformung und der Brandraumtemperatur. Im Versuch 11 dagegen wurde nach kurzem Lastanstieg ein Lastabfall auf der nichttragenden Wand registriert, während die Deckenverformung weiter zunahm.

7.2.4. Darstellung der Meßergebnisse

Die Meßergebnisse sind in der folgenden Tabelle 7.9 zusammengefaßt.

Aus den Zahlenwerten lassen sich zunächst folgende Tendenzen ableiten:

- a) Brandlast und Branddauer beeinflussen den Lastanstieg beim gewählten System anscheinend kaum.

7.2.5. Wertung der Versuchsergebnisse

7.2.5.1. Ursachen des Lastanstiegs

„Nichttragende Trennwände“ können brandschutztechnisch nur dann von Bedeutung sein, wenn sie den Raumabschluß eines Brandabschnitts herstellen, d. h. sie werden in der Praxis nur einseitig beflammt.

Das folgende Bild 7-24 stellt eine Prinzipskizze für eine brandschutztechnisch erforderliche Wand mit den möglichen Zwängungskräften im Brandfall dar.

Tabelle 7.9: Meßergebnisse

Versuch Nr.	Maximalwerte		Endwert		maximaler Lastanstieg/m [Mp/m]	max. Durchbiegung des angrenzenden Deckenfeldes [mm]
	Zeitraum des maximalen Lastenanstiegs	Lastanstieg [Mp]	Zeit [min]	Last [Mp]		
0/2	10.–30. Min.	0,75–5,0	ab 45.	4,3	2,66	7,2
1	0.–30. Min.	0,3–3,9	ab 30.	3,9	2,25	44,8
3	0.–25. Min.	1,4–3,9	115.	4,3	1,56	Messung wegen starker Rauchentwicklung abgebrochen
4	90.–130. Min.	1,8–6,5	150.	5,7	2,94	28
6	5.–20. Min.	1,5–5,1	90.	4,8	2,25	Messung nicht möglich
8	95.–105. Min.	2,9–4,3	105.	4,3	0,88	Messung nicht möglich
11	0.–75. Min.	3,0–1,2	75.	1,2	–1,13	104

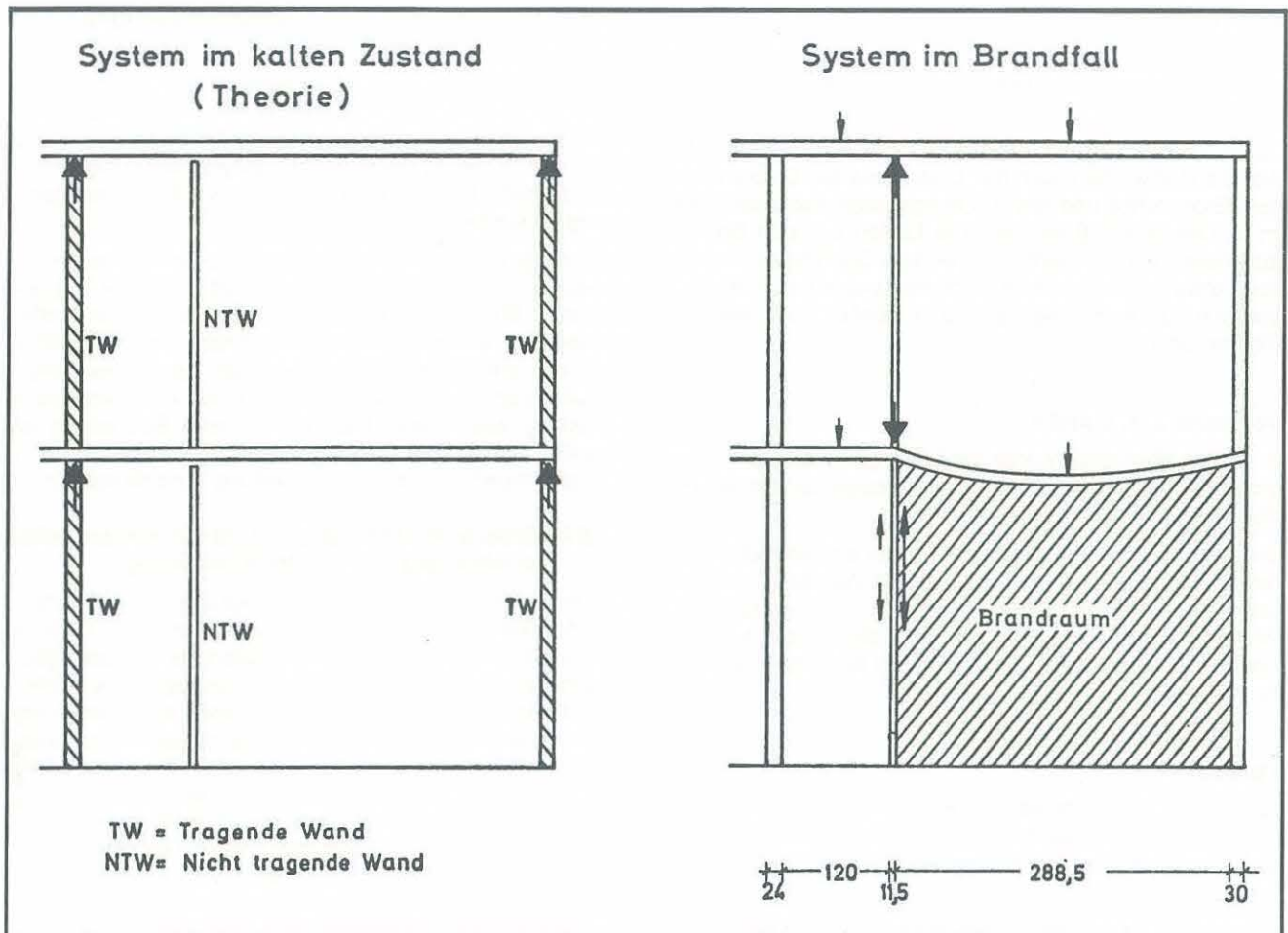


Bild 7-24: Beanspruchung einer nichttragenden Wand im Brandfall (Systemskizze – Versuch 02)

Die Veränderung der gemessenen Vorlast läßt sich auf verschiedene Ursachen zurückführen:

- Die Wand will sich infolge einseitiger Beheizung ausdehnen und ausbiegen und aktiviert dadurch die vorhandene Auflast aus der aufliegenden Decke und den darüberliegenden Geschossen.
- Die aufliegende Stahlbetondecke will sich infolge einseitiger Erwärmung durchbiegen und wird durch die darunterstehende Wand behindert. Wenn in Anlehnung an DIN 1045, Ziffer 20.1.6, Ausgabe 1972, über der Zwischenwand eine Stützbewehrung in der Decke verlegt wurde, bilden sich als Folge der Durchbiegungsbehinderung Zwängungsmomente, die zu einer Vergrößerung des Lastanteils aus der Decke führen.
- Liegt keine obere Bewehrung in der Stahlbetondecke über der Wand, kann die Auflagerkraft abnehmen, da im Zustand I vorhandene Stützkräfte durch Rißbildung abgebaut werden und auch die Auflageranteile aus der konstruktiv vierseitigen Lagerung bei großen Deckenverformungen sich auf die statisch berücksichtigten Auflagerwände verlagern, besonders dann, wenn im Bereich breiter Risse die Querkraftübertragung beeinträchtigt wird.

7.2.5.2. Analyse der einzelnen Versuche

Versuch 02

Versuch 02 ist der einzige Versuch mit einer „nichttragen-

den Wand“, die senkrecht zur rechnerischen Spannrichtung der Geschoßdecke stand (siehe auch Bild 7-24).

Durch die Verformung der EG-Decke werden mit Sicherheit Lasten aus dieser Decke über die untersuchte Wand abgetragen. Durch vertikale bzw. horizontale Verformung der Wand werden unmittelbar auch die Lasten aus Wand und Decke im 1. OG aktiviert. Eine Zusammenstellung dieser Anteile ergibt etwa den gemessenen Lastanstieg.

aus EG-Decke und Decke über 1. OG	
$\sim 2 \times 2,20 \times 500$	= 2200 kp/m
aus Wand im 1. OG	
$\sim 0,115 \times 2,6 \times 1200$	= 360 kp/m
	q = 2560 kp/m
gemessener Lastanstieg	<u>q = 2660 kp/m</u>

Die gute Übereinstimmung ist sicherlich ein Zufall, da bei dieser Überschlagsberechnung weder der konstruktive Querabtrag der Decken – Abbau der Zwängungskräfte – noch eine mögliche Aktivierung von Lasten aus höhergelegenen Geschossen – Anstieg der Zwängungskräfte – berücksichtigt wurde. Der Vergleich zeigt jedoch, daß zumindest in der Größenordnung die in Bild 7-24 dargestellten Zwängungskräfte auftreten können.

Versuch 1

In diesem Versuch wurde der Lastanstieg auf einer 11,5 cm dicken „nichttragenden Wand“ parallel zur Decken-Spannrichtung gemessen.

Durch Verformung der EG-Decke über Raum 1 und der Wand selbst wurden auch hier Lasten aus den Decken über dem Erdgeschoß und dem 1. Obergeschoß sowie der Wand im 1. Obergeschoß aktiviert. Die Lasten aus den Decken resultieren hier aus dem konstruktiven Querabtrag, werden aber etwa in der gleichen Größenordnung liegen wie bei Versuch 02, wenn man je 1,0 m Einflußbreite bei den Decken ansetzt.

Versuche 3, 4, 6 und 8

In diesen Versuchen wurde der Lastanstieg auf den 24 cm dicken Wohnungstrennwänden, die jeweils an den Brandraum anschlossen, gemessen.

Die unterschiedlichen Meßwerte lassen sich vermutlich auf die größere Steifigkeit der 24 cm dicken Wände im darüberliegenden Geschoß und die geringen Verformungen der Wände am Brandraum zurückführen, die zu klein sind, um Lasten aus dem über dem Brandraum liegenden Geschoß zu aktivieren.

Versuch 11

Aus versuchstechnischen Gründen wurde die Wand im darüberliegenden Geschoß abgebrochen. Lasten aus diesem Geschoß waren daher von vornherein nicht zu erwarten.

Durch die aufgegebene Vorlast wurden bereits Zwängungsmomente in der Decke über der Trennwand hervorgerufen, die im wesentlichen durch Zugspannungen im Beton aufgenommen wurden (Zustand I).

Nach kurzzeitigem Lastanstieg bildete sich nach 10 Minuten Branddauer in der Decke ein breiter Riß parallel zur Trennwand. Das Zwängungsmoment wurde abgebaut. Die Auflast aus der Decke nahm ab.

7.2.6. Wertung der Ergebnisse im Hinblick auf DIN 4102 Teil 2

Die Versuchsergebnisse sollen auch eine Antwort auf die in Abschnitt 7.2.1 gestellte Frage nach den Prüfbedingungen für „nichtbelastete Trennwände“ geben.

7.2.6.1. Belastung „nichttragender Wände“

Die Ergebnisse zeigten, daß systembedingt unterschiedliche Lastanstiege registriert wurden, bei denen die einzelnen Einflüsse nicht eindeutig zu trennen waren. Für die Prüfpraxis sollte daher nur eine Belastung gewählt werden, die zwar nicht den Extremfall darstellt, die aber mit größerer Sicherheit bei den meisten Fällen gewährleisten sollte, daß „nichttragende“ Trennwände auch unter Zwängungsbeanspruchung im Brandfall die ihnen zugeordnete, raumabschließende Funktion über einen definierten Zeitraum beibehalten.

Die Größe der Belastung wird neben den statischen Gegebenheiten auch von der Wandkonstruktion, insbesondere von deren Steifigkeit und der Verformbarkeit des Anschlusses abhängen. Es werden weitere Parameterstudien über die Verwendung und den Einbau von nichttragenden Wänden notwendig sein, ehe die Größe der Belastung festgelegt wird.

7.2.6.2. Verformbarkeit eines Deckenanschlusses

Als Alternative zu einer Belastung der „nichttragenden“ Wände müßte auch ein Nachweis der Aufnahme von möglichen Deckenverformungen durch einen verschieblichen Deckenanschluß erlaubt sein. Die Schwierigkeit ist auch hier in der system- und stützweitenabhängig unterschiedlichen Deckenverformung unter Brandbeanspruchung zu suchen.

Im vorliegenden Versuchsprogramm wurden Deckenverformungen von mehr als 100 mm registriert (s. Tabelle 7.9), bei größeren Stützweiten können sie noch erheblich größer werden. Es erscheint daher aussichtslos, ein definiertes Maß der erforderlichen Verformbarkeit eines Deckenanschlusses anzugeben, das von vornherein eine zusätzliche Belastung ausschließt. Hier ist nur eine Beurteilung im Einzelfall möglich, bei dem man die zu erwartenden Deckenverformungen unter Brandbelastung abschätzen kann.

7.2.6.3. Unterschiedliche Beurteilung von Trennwänden in Abhängigkeit von der Ausführung

Die im Rahmen dieses Versuchsprogramms untersuchten Wände sind alle nach der Mauerwerksnorm DIN 1053 zu beurteilen. Sie werden in vielen Fällen zwar nachträglich eingebaut, schließen im allgemeinen aber über eine Mörtelfuge direkt an die Decke an. Diese Wände sind ebenso wie Betonwände nach DIN 1045 oder Wände aus Wandplatten aus Gips mit Nut und Feder nach DIN 18 163 als steife Wände zu betrachten, die erhebliche Lasten aus der behinderten Deckenverformung ohne eigene Vertikalverformung weiterleiten können. Im Brandfall führen horizontale Verschiebungen in Wandmitte und damit verbundene Zusatzmomente infolge Exzentrizität der Lasteinleitung unter Umständen zum vorzeitigen Versagen der Konstruktion. Normprüfungen von nichttragenden Wänden nach den o. a. Normen sollten daher in allen Fällen mit einer Zusatzlast durchgeführt werden.

Leichte Trennwände nach DIN 4103, DIN 18 180 oder in Anlehnung an die Richtlinien für Holztafelbauweise sind im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Wänden nicht einheitlich zu beurteilen. Im Rahmen dieser Arbeit können daher für die verschiedenen Wandausführungen keine Prüfvorschläge gemacht werden, da die einzelnen Wände auf Zusatzbelastungen und Deckenverformungen, je nach Wandsteifigkeit und Ausbildung des Deckenanschlusses, unterschiedlich reagieren.

Biegeeweiche Wände nehmen unter Umständen Deckenverformungen bis zu 10 cm ohne Verlust des Raumabschlusses auf, während z. B. Metallständerwände mit einer „harten Beplankung“ bereits bei geringen Deckenverformungen ausknicken können und den Durchtritt heißer Gase ermöglichen. Um diese Problematik abschließend beurteilen zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

7.2.7. Zusammenfassung

Das durchgeführte Versuchsprogramm sollte Aussagen über das Brandverhalten „nichttragender Wände“ im Einbauzustand ermöglichen, insbesondere über die durch Brandbeanspruchung hervorgerufene Zusatzbelastung der Wände.

Im Abschnitt 7.2.2 und 7.2.3 wurden Versuchsprogramm und -aufbau beschrieben, Abschnitt 7.2.4 zeigte die Versuchsergebnisse. Die Auswertung im Abschnitt 7.2.5 befaßte sich zunächst mit den Ursachen der Lastumlagerung und einer kurzen Analyse der Einzelergebnisse.

Die darauf folgende Wertung im Hinblick auf die Durchfüh-

rung von Brandversuchen an „nichttragenden Wänden“ führte zu dem Ergebnis, daß zumindest „nichttragende“ Wandkonstruktionen im Sinne von DIN 1045, DIN 1053 und DIN 18 163 im Brandversuch nur unter einer Zusatzbelastung geprüft werden sollten. Die Größe dieser Versuchslast muß unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren – einheitliche Prüfbestimmungen, Optimierung von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit, bisherige Prüfpraxis – noch festgelegt werden.

Die Frage, ob „leichte Trennwände“ in Anlehnung an DIN 4103 ebenfalls unter einer Zusatzbelastung zu prüfen sind oder ob sie in der Lage sein müssen, definierte Deckenverformungen ohne Verluste des Raumabschlusses aufzunehmen, kann erst bei genauer Untersuchung der verschiedenen Wandtypen festgelegt werden. Das ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Die Norm muß selbstverständlich die Möglichkeit einer Untersuchung im Einzelfall zulassen, die von definierten Einbauständen ausgehen kann. Bei bekannten Stützweitenverhältnissen und Deckenbelastungen lassen sich die zu erwartenden Deckenverformungen unter Brandbeanspruchung und mögliche Zwängungskräfte bei Behinderung dieser Verformung vorhersagen und bei den entsprechenden Brandversuchen berücksichtigen.

7.3. Das Brandverhalten von Unterdecken im baupraktischen Einbaustand

7.3.1. Allgemeines

In zwei Brandversuchen (Versuch 2 und 7) wurden unter die Stahlbetondecke an zusätzlich eingebauten Stahlträgern I 140 handelsübliche Unterdecken eingebaut, die nach der zur Zeit der Versuchsdurchführung gültigen DIN 4102, Ausgabe 1970, und entsprechenden Prüfungszeugnissen im Zusammenhang mit einer Stahlträgerdecke mit Betonabdeckung in bestimmte Feuerwiderstandsklassen einzustufen waren.

Allgemeingültige Aussagen waren bei diesen Versuchen nicht zu erwarten, zumal gegenüber Normversuchen nur ein begrenztes Meßprogramm durchgeführt werden konnte. Diese Versuche sollten auf Probleme hinweisen, die eine allgemeine Verwendung von Unterdecken als Brandschutz mit sich bringt:

- a) Entspricht das Verhalten von Unterdecken bei natürlichen Bränden etwa dem Verhalten beim Normbrand?
- b) Reichen Normprüfungen nach DIN 4102 für eine allgemeine Beurteilung der Unterdecke aus?
- c) Sind unter Umständen zusätzliche Prüfungen mit einer anderen Temperaturkurve notwendig, um das vorhandene Sicherheitsrisiko abzudecken?

7.3.2. Versuchsaufbau

In beiden Versuchen wurden sowohl im Raum 1 als auch im Raum 2 unmittelbar unter die Stahlbetondecke Stahlträger

I 140 im Abstand von 0,9 m eingezogen mit Auflager auf den vorhandenen Wänden. Unter den Stahlträgern wurde eine Metallrasterunterkonstruktion eingebaut, die im Normversuch geprüften Konstruktionen entsprach.

7.3.2.1. Versuch 2

In diesem Versuch bestand keine Verbindung zwischen den Deckenhohlräumen beider Räume. Unter die Metallrasterkonstruktion wurde eine Plattendecke aus vorgefertigten, miteinander verspachtelten, 12,5 mm dicken Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) entsprechend einem Prüfungszeugnis nach DIN 4102 (Ausgabe 1970) eingebaut.

7.3.2.2. Versuch 7

Die Wand zwischen Raum 1 und 2 wurde im Bereich des Deckenanschlusses ausgestemmt, so daß ein durchgehender Deckenzwischenraum entstand. Unter die Metallrasterkonstruktion wurde eine Mineralfaserplattendecke (Plattengröße 625 × 625 mm) mit verdecktem Abhängesystem entsprechend einem Prüfungszeugnis nach DIN 4102 (Ausgabe 1970) eingebaut.

Um eine Brandlast im Deckenhohlraum darzustellen, wurden Holzplatten etwa in Raummitte im Deckenhohlraum angeordnet, so daß eine Übertragung des Feuers von einem Raum zum anderen unter Umständen möglich war. Auf den gesamten Hohlraum verteilt entsprach das einer Brandbelastung von 6 Mcal/m².

Neben der Druckmeßanlage des Instituts für Wärmetechnik und Industrieofenbau der Technischen Universität Clausthal wurden im Raum 2 zusätzlich Schrägrohrmanometer installiert, die den Druck zwischen Unterdecke und Stahlbetondecke, unter der Unterdecke und 10 cm über dem Fußboden registrierten.

7.3.3. Darstellung der Meßergebnisse

Die in den Bildern 7–27 und 7–34 dargestellten Temperaturverläufe (Brandraum und Stahlträger) geben eine ausreichend genaue Auskunft über das Brandverhalten der Unterdecken wieder, besonders wenn sie in Verbindung mit den von außen gemachten Beobachtungen gebracht werden.

Ein exakter Zeitpunkt, an dem die ersten Unterdeckenplatten abfielen, läßt sich nicht festlegen, da bei maximaler Brandentwicklung eine genaue Beobachtung der Unterdecke nicht möglich war.

7.3.3.1. Versuch 2

Nach 15 Minuten hatten die Brandraumtemperaturen bei einer Brandlast, die etwa 40 kg Holz/m² entsprach, ein Maximum von etwa 900 °C erreicht. In der 50. Minute wurde in der Deckenebene eine mittlere Temperatur von ca. 300 °C ermittelt. Die ersten GKF-Platten fielen im Raum 1 nach einer Brandbeanspruchung von etwa 30 Minuten ab. Nach Versuchsende waren im Raum 1 noch etwa 80 % der Platten erhalten (s. Bild 7–25).



Bild 7-25: GKF-Unterdecke in Raum 1

Die Stahlträgertemperaturen erreichten in der 35. Minute Maximalwerte von 320 °C. Sie lagen damit erheblich unter den kritischen Stahltemperaturen von ca. 500 °C.

Raum 2 wurde nach etwa 100 Minuten Versuchsdauer gezündet, da sich das Feuer in der Wohnung nicht ausbreitete. In der 120. Minute wurden maximale Raumtemperaturen von ca. 1000 °C gemessen, in der 150. Minute lag das Temperaturmaximum bei 350 °C. Auch hier wurde etwa 30 Minuten nach der Zündung das Abfallen der ersten GKF-Platten registriert, zum Versuchsende waren dagegen nur

noch etwa 10 % der GKF-Platten an der Decke, außerdem fielen noch Teile des Deckenputzes ab (s. Bild 7-26). Die Stahlträgertemperaturen blieben auch in Raum 2 mit 480 °C unter der kritischen Stahltemperatur.

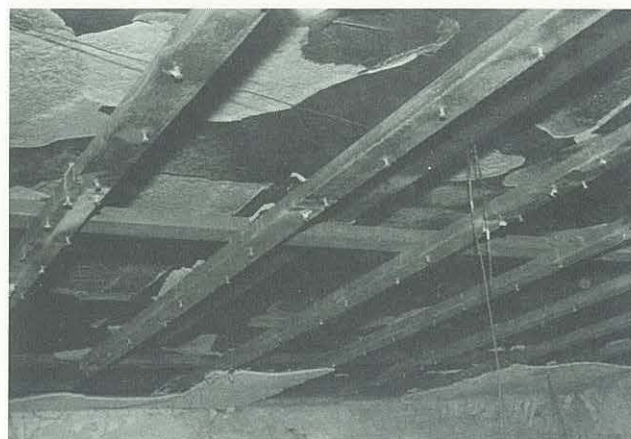


Bild 7-26: GKF-Unterdecke in Raum 2

Eine Zusammenstellung der Temperaturverläufe von Raum 1 und 2 ist in Bild 7-27 wiedergegeben.

7.3.3.2. Versuch 7

Nach mehrmaligem Zünden fingen die ersten Krippen in der 33. Minute an zu brennen. Bereits in der 40. Minute wurden

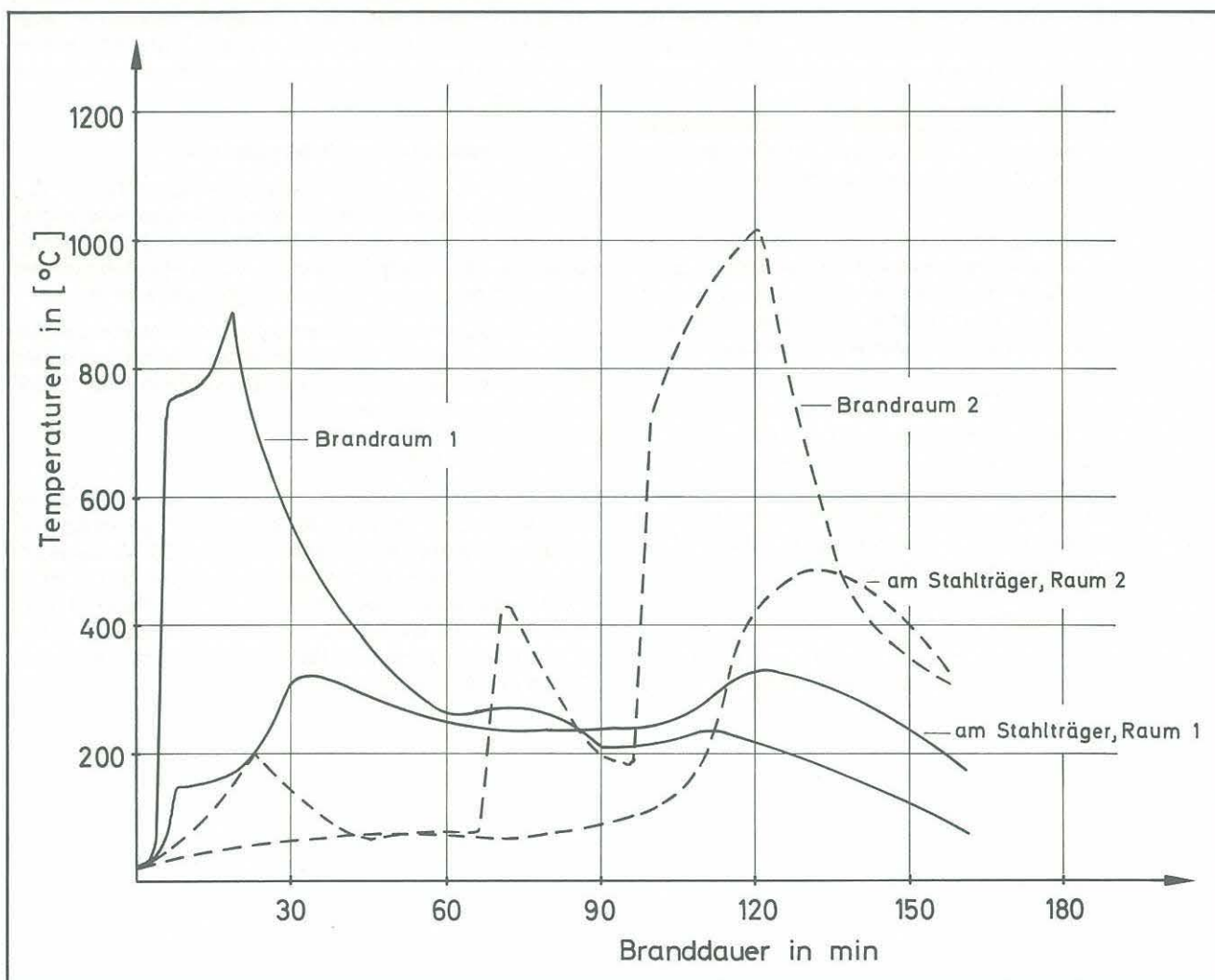


Bild 7-27: Brandraumtemperatur und Temperaturen am Stahlträger (Versuch 2)

Temperaturen von ca. 800 °C an der Decke registriert. Nachdem in der 46. Minute alle Krippen brannten, stiegen die Temperaturen unter der Decke bis zur 75. Minute auf 1100 °C weiter an. Die Brandlast betrug 60 kg Holz/m².

Da sich die ersten Unterdeckenplatten bereits in der 66. Minute im Fensterbereich lösten und in der 69. Minute abfielen, wurde die kritische Stahltemperatur bei dem am Fenster liegenden Träger in der 65. Minute, d.h. etwa 30 Minuten nach der Zündung, überschritten. In der 80. Minute wurden am Stahl Maximalwerte von 900 °C registriert. In der 83. Minute waren fast alle Unterdeckenplatten abgefallen. Einen optischen Eindruck über den Brandverlauf in Raum 1 gibt die Bildserie der Bilder 7–28 bis 7–33 wieder.

Eine Brandübertragung durch den Deckenzwischenraum mit der vorhandenen Brandbelastung von 6 Mcal/m² konnte nicht registriert werden, da dem Hohlraum vermutlich der Sauerstoff durch den voll entwickelten Brand in Raum 1 entzogen wurde.

Die Druckmessungen im Raum 2 zeigen zwischen Rohdecke und Unterdecke etwa von der 60. Minute an einen Überdruck an, der auf eine bereits undichte Unterdecke im Raum 1 schließen lässt. Der Druck steigt etwa bis zur 80. Minute (maximale Brandentwicklung im Raum 1) auf etwa 0,9 mm WS an. Die Messungen unter der Unterdecke und am Boden im Raum 2 ergaben in diesem Zeitraum etwa einen Druck von ± 0 mm WS.

In der 100. Minute wurde Raum 2 gezündet, und bereits 10 Minuten später wurden Raumtemperaturen von maximal 900 °C registriert. Die höchsten Raumtemperaturen wurden in der 150. Minute mit etwa 1150 °C gemessen.

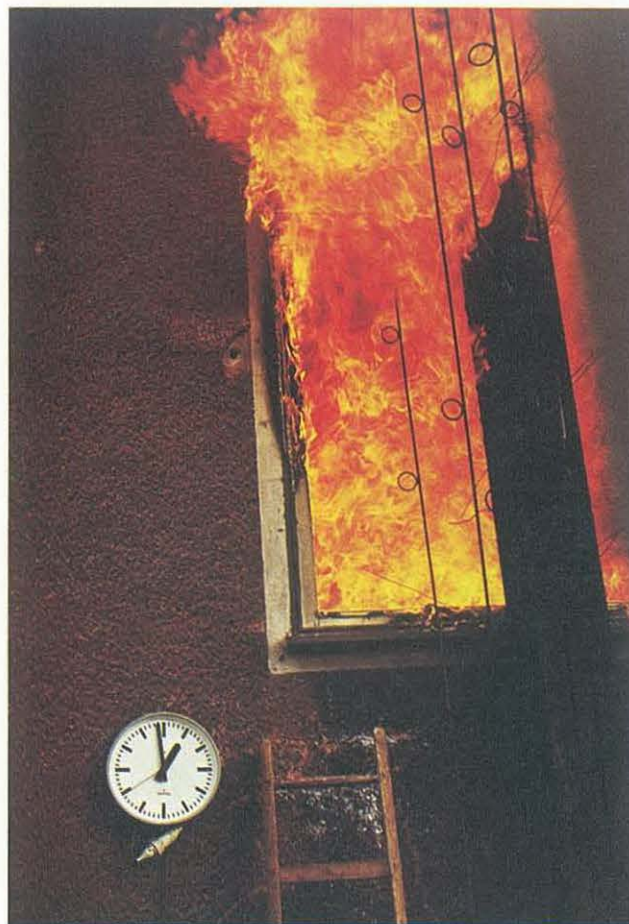


Bild 7–29: 59. Minute

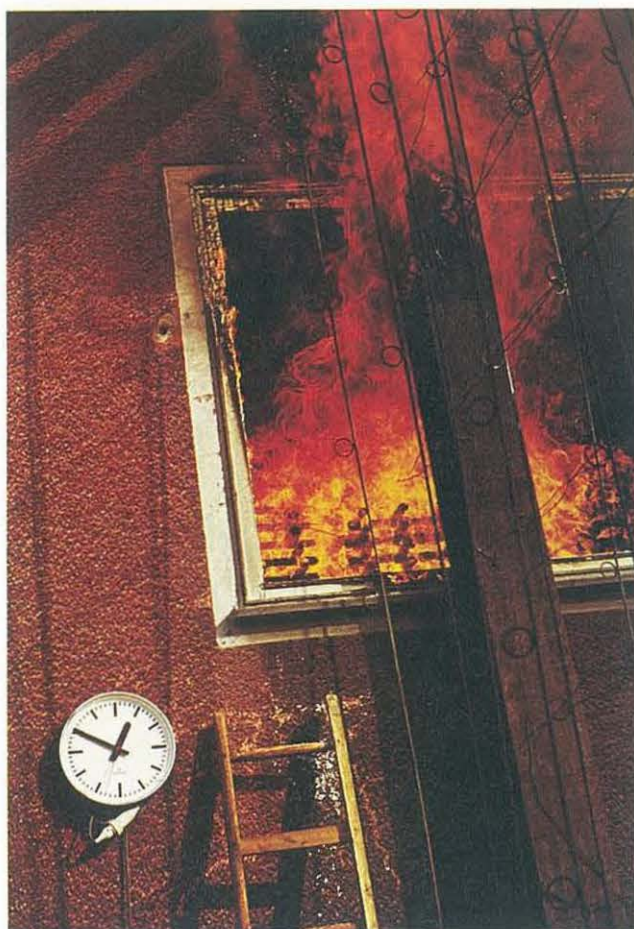


Bild 7–28: 50. Minute

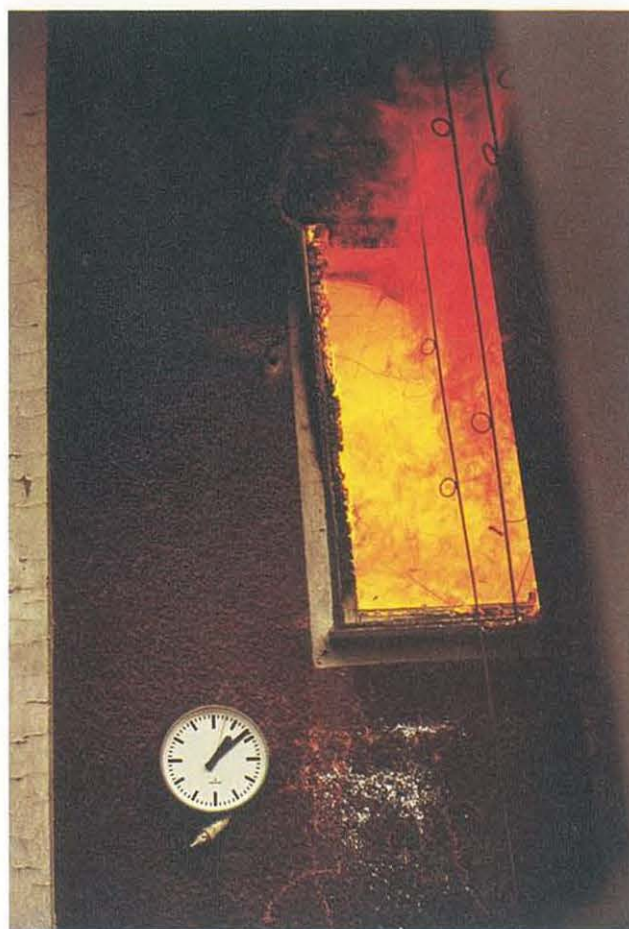


Bild 7–30: 68. Minute, Unterdeckenplatten lösen sich

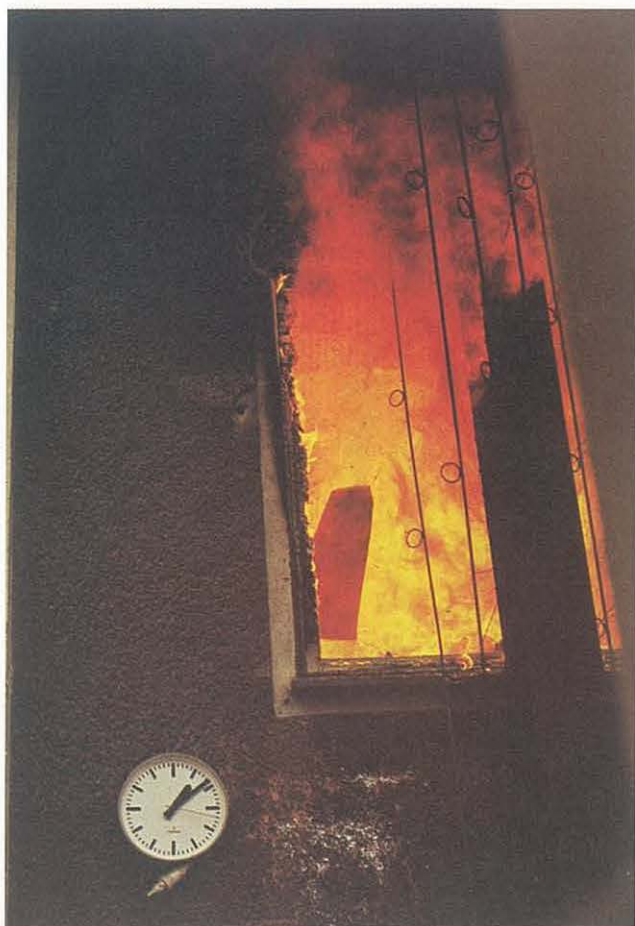


Bild 7-31: 69. Minute, Unterdeckenplatte fällt ab



Bild 7-32: 84. Minute

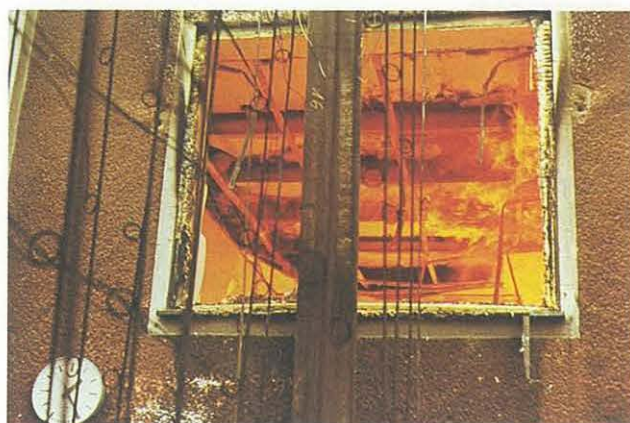


Bild 7-33: 85. Minute

Die ersten Unterdeckenplatten fielen in der 155. Minute, d. h. 55 Minuten nach der Zündung, ab, die Stahlträgertemperaturen – bis zu diesem Zeitpunkt max. 300 °C – stiegen bis zur 160. Minute auf 700 °C an (auch etwa maximale Raumtemperatur in der 160. Minute). Da die Raumtempera-

turen in dieser Brandphase bereits stark abfielen, gingen auch die Stahlträgertemperaturen zurück. Eine Zusammenstellung der Temperaturverläufe von Raum 1 und 2 zeigt Bild 7–34. Auch der Brandverlauf in Raum 2 ist in einer Bildserie (Bild 7–35 bis 7–38) wiedergegeben.

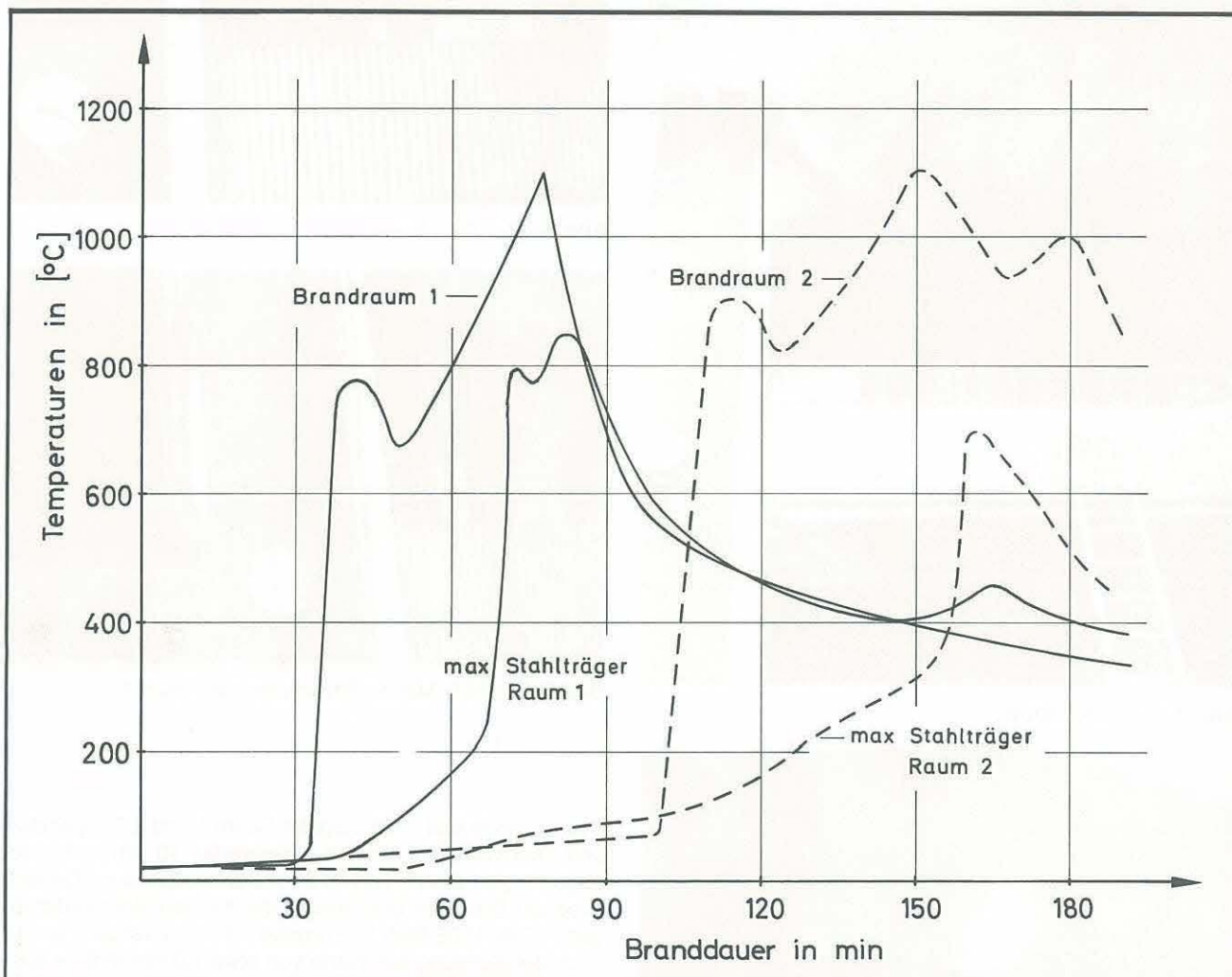


Bild 7–34: Brandraumtemperaturen und Temperaturen am Stahlträger (Versuch 7)



Bild 7-35: 105. Minute



Bild 7-36: 110. Minute



Bild 7-37: 159. Minute



Bild 7-38: 161. Minute Feuerschein in Raum 1

Das folgende Bild 7-39 zeigt für Raum 1 und 2 Temperatur- und Druckverläufe (jeweils Mittelwerte) 10 cm unter der abgehängten Decke und im Deckenzwischenraum. Danach stieg der Druck im Brandraum, der mit den Normforderungen in DIN 4102 Blatt 2, Ausgabe 1977, zu vergleichen ist, nach der Zündung auf Werte von etwa 1,0 mm WS (= 9,81 Pa) an. In der Tendenz konnten bei allen Versuchen ähnliche Werte registriert werden; lediglich in zwei Versuchen wurden kurzzeitig Druckspitzen von ca. 4 mm WS (= 39,24 Pa) gemessen.

Der Druck im Deckenzwischenraum stieg dagegen über Raum 1 wesentlich langsamer und erreichte zur gleichen Zeit wie das Temperaturmaximum im Deckenzwischenraum einen Maximalwert von etwa 1,3 mm WS (= 12,75 Pa). Da die Deckenzwischenräume über Raum 1 und 2 nicht getrennt waren, wurde im Deckenzwischenraum über Raum 2 der gleiche Druckverlauf gemessen.

7.3.4. Wertung der Versuchsergebnisse

7.3.4.1. Gipskarton-Decken

Die GKF-Unterdecken fielen nach steilem Brandraumtemperaturanstieg jeweils etwa 30 Minuten nach Versuchsbeginn in der Abkühlungsphase ab. Da infolge verhältnismäßig geringer Brandlast die Brandraumtemperaturen bereits nach etwa 40 Minuten unter 500 °C lagen, wurden die kritischen Stahltemperaturen, bei denen – unter zulässiger Gebrauchslast – die Fließgrenze auf den Wert der effektiv wirkenden Stahlspannung abfällt, an den eingezogenen Stahlträgern nicht erreicht. Bei einer größeren Brandlast mit

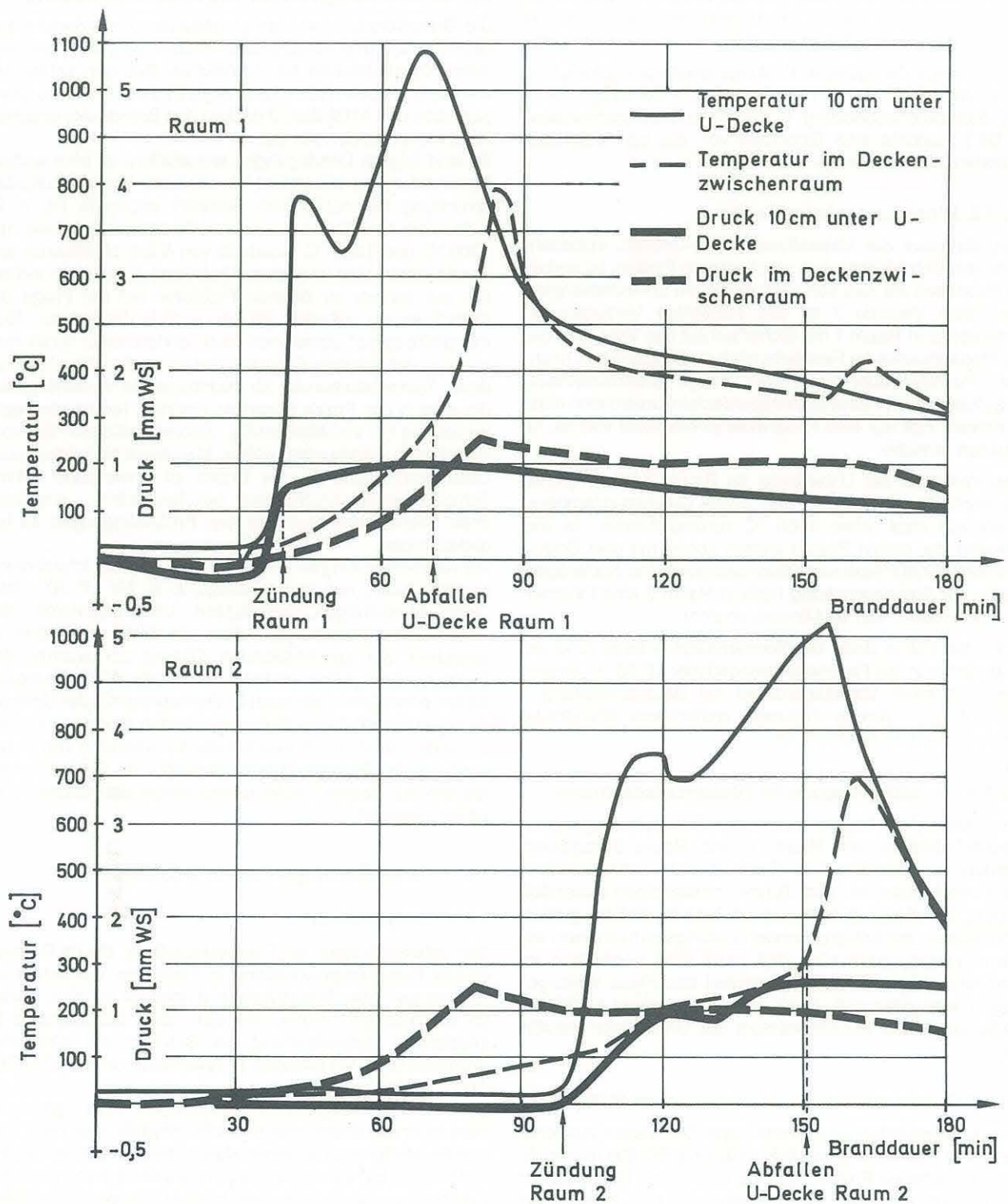


Bild 7-39: Temperatur- und Druckmessungen (Versuch 7)

länger anhaltenden hohen Temperaturen im Brandraum wären die kritischen Stahltemperaturen mit Sicherheit erreicht bzw. überschritten worden.

Die Aussage des gültigen Prüfungszeugnisses (Einstufung einer Unterdeckenkonstruktion unter einer Stahlträgerdecke mit Stahlbetonabdeckung in die Feuerwiderstandsklasse „F 90“) täuschte eine Sicherheit vor, die bei natürlichen Bränden nicht immer vorhanden ist.

7.3.4.2. Mineralfaserplatten-Decken

Das Verhalten der Mineralfaserplatten-Decken, insbesondere von Unterdecken aus montierbaren Platten, ist anders zu beurteilen als das von verspachtelten Unterdeckenplatten. Beim Versuch 7 ist das frühzeitige Versagen der Unterdecke in Raum 1 mit Sicherheit auf das Versagen des Randanschlusses im Fensterbereich zurückzuführen, nachdem Putzteile über dem Sturz infolge Brandeinwirkung abgefallen waren. Eine Stahlträgerdeckenkonstruktion hätte in diesem Fall nur eine Feuerwiderstandsdauer von ca. 30 Minuten erreicht.

Das Versagen der Unterdecke im Raum 2 ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die sehr hohen Brandraumtemperaturen von max. etwa 1150 °C zurückzuführen, da das Abfallen der ersten Platten zeitlich genau mit dem Brandraumtemperaturmaximum übereinstimmt. Eine Stahlträgerdecke mit Betonabdeckung hätte in Raum 2 eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten erreicht.

In beiden Fällen deckt die Normaussage – Einstufung der Unterdecke in die Feuerwiderstandsdauer „F 90“ in Verbindung mit einer Stahlträgerdecke mit Betonabdeckung – nicht das in diesen Räumen vorhandene Brandrisiko (Brandlast 60 kg Holz/m²) ab.

7.3.4.3. Brandübertragung im Deckenzwischenraum

Beim Versuch 7 konnte zwar keine Brandübertragung im Deckenhohlraum von Raum 1 und Raum 2 registriert werden, da der Brand in Raum 1 dem sehr niedrigen Deckenhohlraum den zum Zünden notwendigen Sauerstoff entzog. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß bei großen Hohlräumen mit entsprechenden Lüftungsverhältnissen ein Brand weitergeleitet wird, daß nach dem Verlöschen im Deckenhohlraum durch Schwelbrand das Feuer weitergetragen wird oder daß durch in den Hohlraum gedrückte heiße Gase das Abhängesystem der Unterdecke zerstört wird.

7.3.4.4. Druckverhältnisse bei Unterdecken-Prüfungen

Alle durchgeführten Druckmessungen bestätigten zunächst die in der Neufassung von DIN 4102 und ISO 834 allgemein vorgeschlagenen Prüfbedingungen, die einen Überdruck im Brandraum vorsehen. Speziell bezogen auf Unterdecken zeigte sich, daß bei intakter Unterdecke ein Druckgefälle zwischen Brandraum und Deckenzwischenraum aufgebaut wird. Bei Zerstörung der Unterdecke und einem über mehrere Räume durchgehenden Deckenzwischenraum stellt sich dort ein Überdruck ein, der heiße Gase unter Umständen in die nicht beheizten Nachbarräume drückt.

7.3.4.5. Schlußfolgerungen und Zusammenfassung

Die Brandversuche an den eingebauten Unterdecken aus GKF-Platten und Mineralfaser-Platten zeigten, daß sich diese Konstruktionen bei natürlichen Bränden schlechter verhalten als beim Normbrand nach DIN 4102. Normprüfungen nach DIN 4102 Blatt 2 decken das Brandrisiko anscheinend nicht ausreichend ab.

Es sind folglich Überlegungen anzustellen, ob eine weitere Normprüfung zu erarbeiten ist, die einer Temperaturbeanspruchung bei natürlichen Bränden angepaßt ist, z. B. Aufheizen des Brandraumes auf Temperaturen zwischen 1000 °C und 1200 °C innerhalb von 5 bis 10 Minuten und anschließend eine langsame Abkühlung. Es werden sicherlich nur schwer zu lösende Probleme bei der Frage der Klassifizierung auftreten, da man von der bisherigen „Normenphilosophie“ abweichen muß, andererseits findet man auch in der jetzigen Fassung der Norm bereits abgeminderte Temperaturkurven für nichttragende Außenbauteile, die eine in der Praxis erwartete niedrige Temperaturbeanspruchung bei verhältnismäßig „unempfindlichen“ Baukonstruktionen wiedergeben sollen. Man sollte sich daher auch dazu durchringen, in der Praxis zu erwartende höhere Temperaturbeanspruchungen bei besonders „empfindlichen“ Baukonstruktionen in den Prüfbedingungen zu berücksichtigen.

Als Alternativlösung bietet sich an, bestimmte Unterdeckenkonstruktionen nur noch bedingt, z. B. für „F 30“- oder „F 60“-Einstufungen, zuzulassen und ansonsten den Brandschutz grundsätzlich über die Rohkonstruktion zu erreichen. Zur abschließenden Klärung der anstehenden Probleme sind jedoch umfangreiche weitere Forschungsarbeiten erforderlich, die auch in Verbindung mit der Untersuchung von natürlichen Bränden erfolgen müssen, um festzustellen, ob in der Praxis bei der Verwendung von Unterdecken ein Sicherheitsrisiko besteht. In Großbritannien wurden auf diesem Gebiet bereits einige statistische Vorarbeiten geleistet.

7.4. Untersuchungen an Feuerschutztüren

7.4.1. Allgemeines

Die Untersuchungen an Feuerschutztüren, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens in mehreren Versuchen als Wohnungs- bzw. Brandraumtür eingebaut wurden, sollten im wesentlichen zeigen, wie sich diese Bauelemente im gegebenen Einbauzustand bei Bränden mit natürlicher Brandlast bzw. bei Bränden in Anlehnung an die ETK (DIN 4102) verhalten.

Bei den umfangreichen Messungen des gesamten Versuchsprogramms war es nicht möglich, das bei Türen übliche Meßprogramm eines Normbrandversuches nachzuvollziehen. Es sollten deshalb im wesentlichen qualitative Erkenntnisse, verbunden mit einigen Temperaturmeßwerten, gesammelt werden, die darüber Auskunft geben sollten, wie einige bauaufsichtlich zugelassene Türen die ihnen zugedachte Funktion eines Brandraumabschlusses übernehmen und ob die im Normversuch festgestellte leichte Qualmentwicklung z. B. die Benutzung des Treppenhauses beeinträchtigt.

7.4.2. Untersuchte Türen

In der folgenden Tabelle 7.10 sind die bei den einzelnen Versuchen eingebauten Türen zusammengestellt.

Tabelle 7.10: Eingebaute Türentypen

Versuch	Raum – Wohnung	Brandlast ¹⁾ [kg/Holz/m ²]	
5	3–W5	15 (30,60)	Schörghuber Form-Brand-schutztür Typ 1-T30, Holztür mit in den Flächen und Kanten eingearbeiteten „Palusol-Brandschutzplatten“
8	3–W8 3–W12	15 (90) — (30)	Stahltür „PS 75“ der Deutschen Metalltüren-Werke, August Schwarze AG, T 30
9	3–W1	ETK – 90 min	Promat-Feuerschutztür, T 90

¹⁾ Die Klammerwerte geben die Brandlast in den angrenzenden Räumen an.

Die Übersicht zeigt, daß bei den Versuchen 5 und 8 im direkt an die Tür anschließenden Raum (Flur – Raum 3) maximal eine Brandlast von 15 kg Holz/m² gelagert war. Die Brandraumtemperaturen wurden jedoch auch durch die Brandlast in den angrenzenden Räumen beeinflusst, da deren Holztüren zum Flur geöffnet waren und restlos verbrannten.

7.4.3. Brandverhalten der Türen

Im folgenden Bild 7-40 ist die Temperaturentwicklung jeweils in Türsturzhöhe im Brandraum und außerhalb des Brandraums aufgetragen.

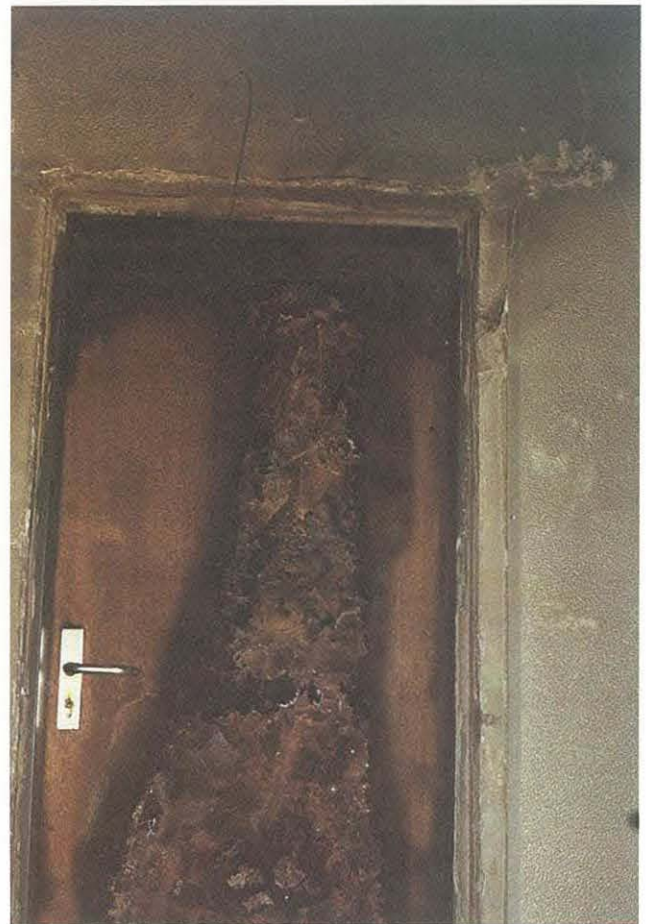


Bild 7-41: Schörghubertür (80. Minute)

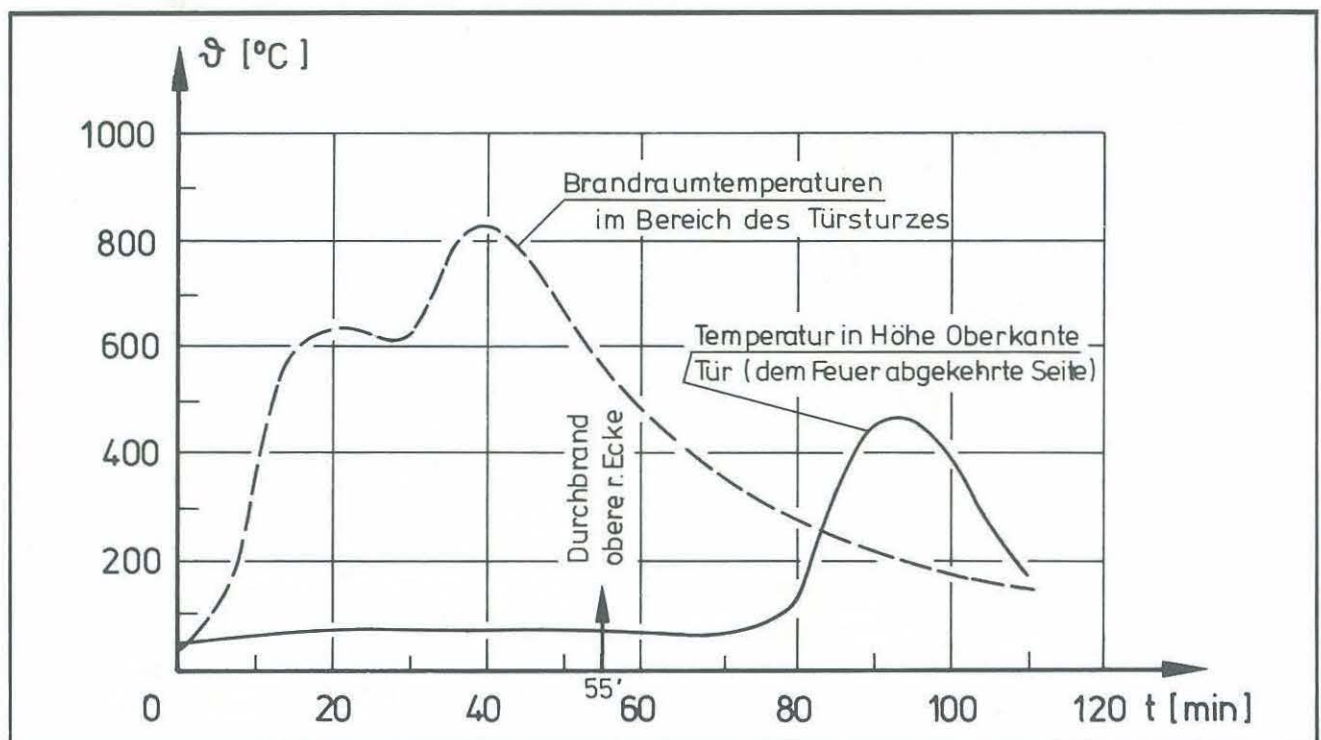


Bild 7-40: Temperaturentwicklung – Holztür mit Palusol

Es zeigte sich, daß trotz eines Durchbrandes in der rechten oberen Türecke in der 55. Minute erst nach dem Durchbrand in der mittleren Türfläche etwa in der 80. Minute ein deutliches Ansteigen der Temperaturen auf der dem Feuer abgekehrten Seite registriert werden konnte, da die Oberfläche großflächig unter Flammenbildung abbrannte (s. Bild 7-41).

Die nach DIN 4102 zulässige mittlere Temperaturerhöhung von 140 °C auf der dem Feuer abgekehrten Oberfläche der Tür wurde etwa in der 50. Minute überschritten. Eine Beeinträchtigung der Schutzfunktion durch Qualmentwicklung konnte bis zu diesem Zeitpunkt nicht festgestellt werden.

Bild 7-42 zeigt die Brandraum- und die Oberflächentemperaturentwicklung auf der Stahltür im Versuch 8 (Wohnung 8).

Die Überschreitung der zulässigen Oberflächentemperaturen konnte erst nach der 90. Minute festgestellt werden.

Das Bild 7-43 läßt erkennen, daß die Tür nur im oberen Bereich etwas verzogen war und den Durchtritt von Rauch ermöglichte. Die Benutzung des Treppenhauses wurde durch diese Rauchentwicklung nicht wesentlich beeinträchtigt. Die Tür wurde während des Versuchs zur Beobachtung des Brandablaufs wiederholt geöffnet.

Bei Versuch 9 mit Brandraumtemperaturen in Anlehnung an DIN 4102 lagen die mittleren Temperaturen im Bereich des Türsturzes etwa 150 – 200 °C unter der Einheitstemperaturkurve, da der Brandraum infolge der einseitigen Brenneranordnung nicht gleichmäßig aufgeheizt wurde.



Bild 7-43: Stahltür (Deutsche Metalltüren-Werke) – Versuchsende

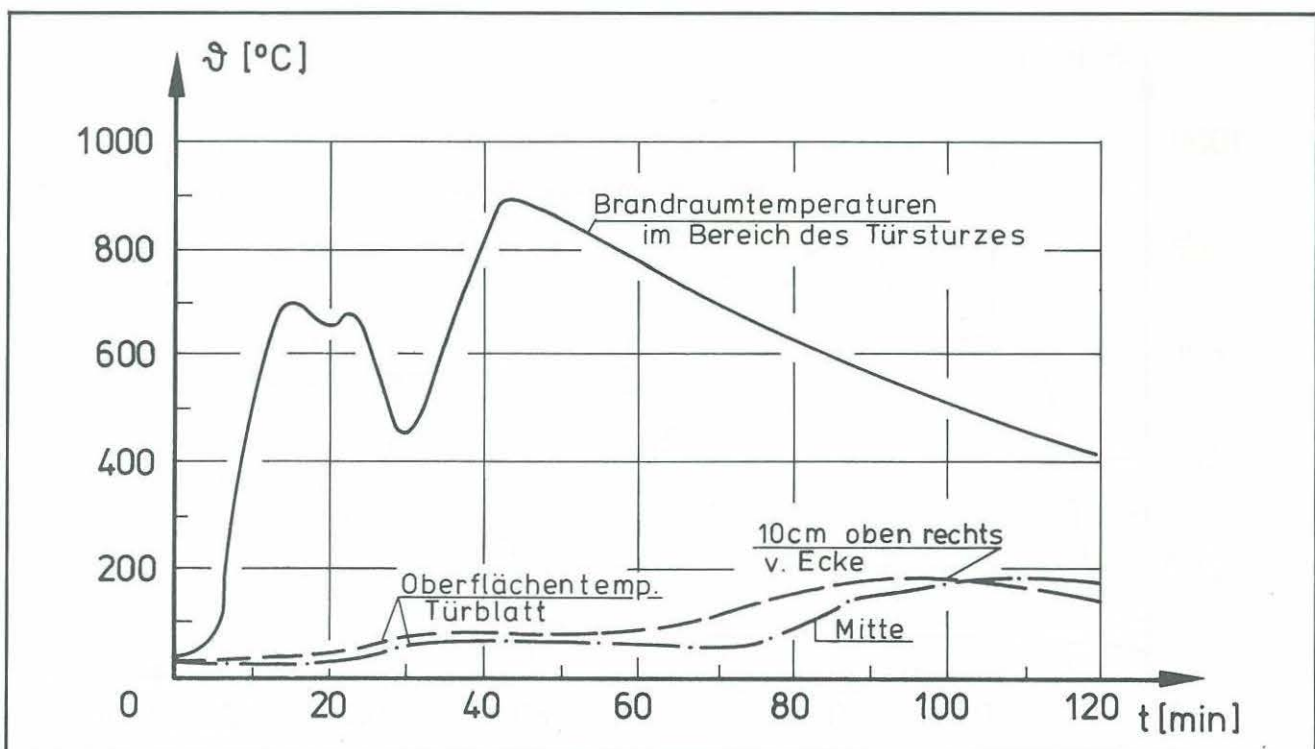


Bild 7-42: Temperaturentwicklung Stahltür PS 75 – Wohnung 8

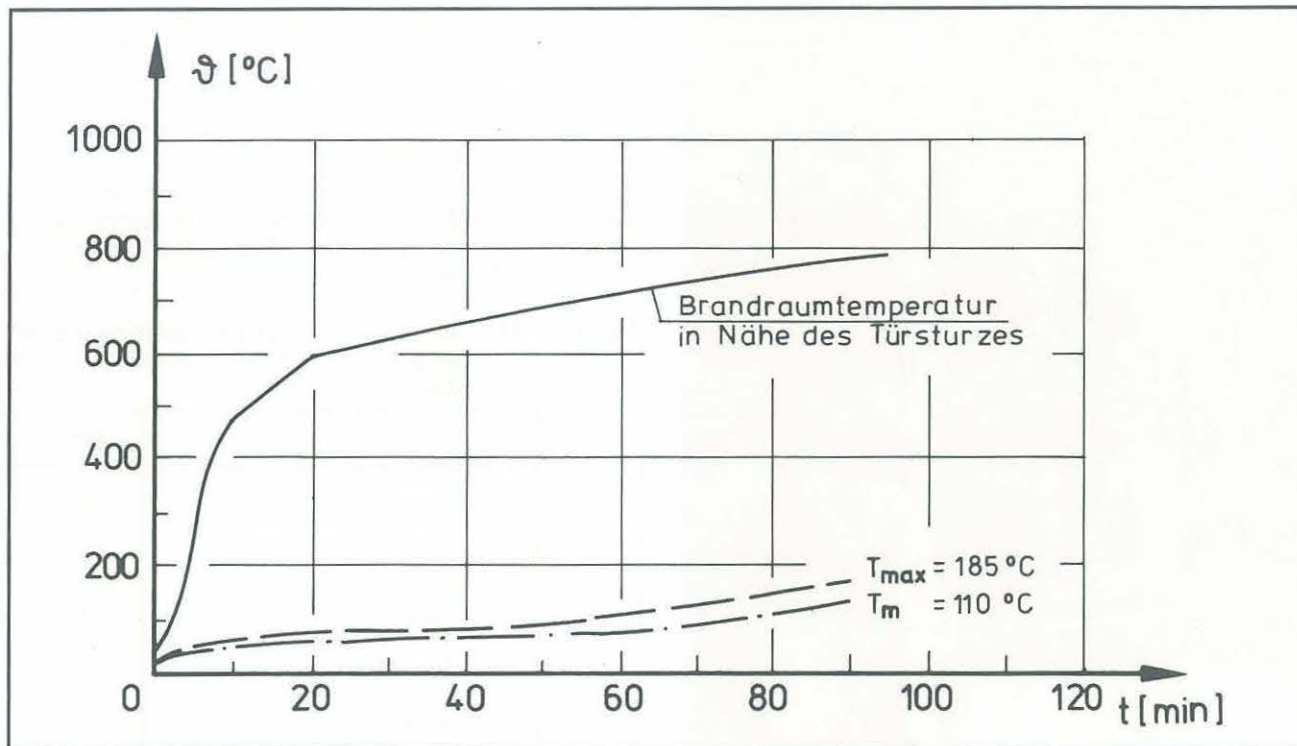


Bild 7-44: Temperaturentwicklung, Promat-Tür

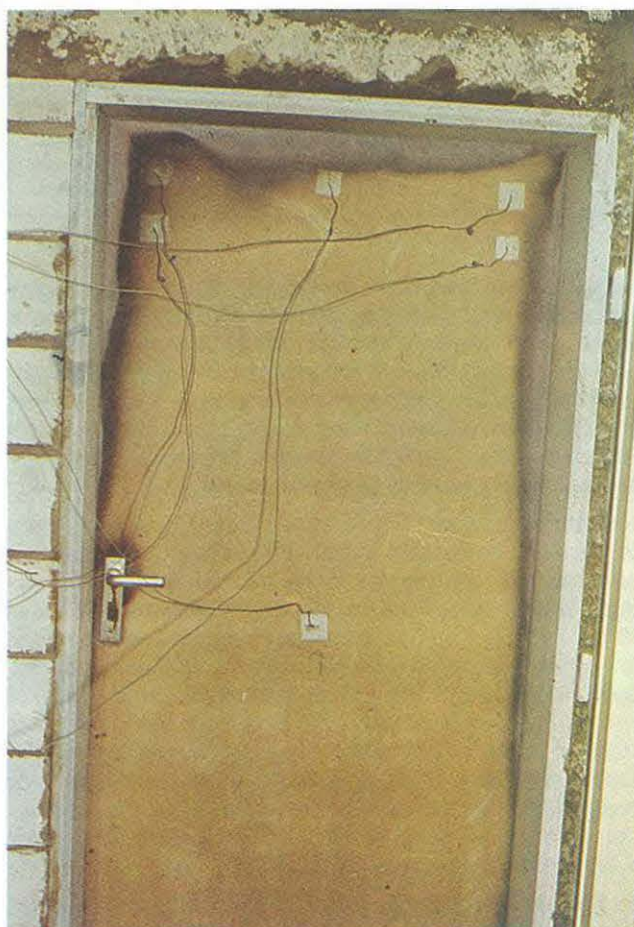


Bild 7-45: Promat-Tür nach dem Brandversuch

Die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche zeigt, daß die zulässigen Temperaturwerte nach einer Brandbeanspruchung von 90 Minuten bei weitem nicht erreicht wurden. Bemerkenswerte Beobachtungen – Qualm, Verformungen – konnten während des Versuchs nicht gemacht werden. Das Bild 7-45 zeigt die Promat-Tür nach dem Versuch mit Temperaturverfärbungen im Randbereich.

Alle untersuchten Türen erfüllten somit die erwarteten Funktionen ohne Schwierigkeiten. Die Fluchtwege wurden von hohen Temperaturen und starkem Qualm freigehalten, wobei auch bei großen Brandlasten eine T-30-Stahltür bis zum völligen Abbrand die volle Schutzfunktion übernahm und zusätzlich jederzeit zu Beobachtungszwecken zu öffnen war.

7.4.4. Brandverhalten einer Rauchabzugsklappe

In die Balkontüröffnung des Raumes 1 wurde bei Versuch 5 eine Rauchabzugsklappe der Firma Klaus Esser KG, Büro Hannover, eingebaut. 4 Minuten nach Entzünden des Brandraumes öffnete sich die Klappe. Die Temperaturen in Fensternähe betrugen zu diesem Zeitpunkt ca. 250 °C.

Die an ihrem unteren Ende gelenkig gelagerte Klappe hatte in geöffneter Stellung einen Winkel von ca. 50° zur Außenwand, so daß im oberen Teil der Öffnung die Rauchgase ungehindert ausströmen konnten. Im unteren Teil der Öffnung wurde die Klappe angeströmt, die Rauchgase wurden umgelenkt und strömten ebenfalls durch den hochliegenden Teil der Öffnung ab (Bild 7-46).

Entsprechend den Versuchsbeobachtungen erscheint der Einbau von Rauchabzugsklappen nur dann sinnvoll, wenn damit Fluchtwege vom Rauch befreit werden. Nicht ungefährlich erscheinen diese Klappen jedoch dort, wo sie bei einem möglichen Brand die Ventilation verbessern und zu einer höheren Zufuhr von Sauerstoff zur Brandlast beitragen können.



Bild 7-46: Die Rauchabzugsklappe hat sich geöffnet. Flammen und Rauchgase durchströmen die Öffnung.

7.4.5. Brandverhalten von Glasfasergardinen

Bei den Versuchen 6 (Raum 4) und 7 (Raum 2) wurden von der Firma Interglas, Ulm, Glasfasergardinen zur Verfügung gestellt, um deren Verhalten bei einem natürlichen Brand zu untersuchen. Es konnte festgestellt werden, daß die vor dem geöffneten Küchenfenster (Versuch 6, Raum 4) hängende Glasfasergardine das Brandgeschehen deutlich beeinflusste. Nach Entzünden des Raumes verhinderten die Gardinen das Herausschlagen der Flammen aus dem Fenster. Starke Rauchschwaden drangen durch die Gardinen, die diese wie ein Segel aufbliesen; die Gardine wurde erst spät zerstört. Durch das Verhindern einer natürlichen Querbelüftung waren jedoch die Temperaturen in diesem Brandraum höher als sie bei den vorhandenen Ventilationsbedingungen ohne Behinderung der Rauchgasströmung gewesen wären (Vergl. Bild 6-28).

Da der Einsatz einer Glasfasergardine den allgemeinen Versuchszielen widersprach (ungestörte Entwicklung des Brandes), wurde bei Versuch 7 die Gardine lediglich an die Seite der Ventilationsöffnung gehängt, wobei sie dem Brandgeschehen lange Zeit widerstand.

7.4.6. Äquivalente Normbranddauer

Als Beitrag zur Bestimmung der „äquivalenten Normbranddauer“ der natürlichen Brände im Lehrter Versuchshaus wurden von Mitarbeitern der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, bei einigen Versuchen zusätzliche Messungen vorgenommen.

Es wurde die Temperaturerhöhung in einem „Vergleichsbauenteil“ gemessen. Das Vergleichsbauenteil bestand aus einem Stahlblock, in dessen Zentrum ein Thermoelement angebracht war, der – durch Vermiculite isoliert – in einem kurzen, durch Gewindekappen beidseitig verschlossenen Stahlrohr untergebracht war.

Die vom Vergleichsbauenteil registrierten Temperaturmessungen sind von Knublauch nach einem in [3] beschriebenen Verfahren ausgewertet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.11 dargestellt.

Tabelle 7.11: Meßwerte, äquivalente Normbranddauer, ermittelt mit Hilfe des Vergleichskörpers BAM

Versuch	Meßort	Werte t_a
01	Raum 5	27 min
02	Raum 4	39 min
1	Raum 1	49 min
3	Raum 1	38 min
4	Raum 2 Raum 4 Raum 5 vor dem Fenster Raum 1	55 min 41 min 42 min 33 min
5	Raum 1 vor dem Fenster Raum 1 vor dem Fenster Raum 2 Raum 6 Raum 3	41 min 31 min 49 min 46 min 46 min
6	Wohnung 7 Raum 1 Wohnung 7 Raum 2 Wohnung 7 Raum 3	43 min 38 min 22 min
8	Wohnung 12 Raum 1 Wohnung 12 Raum 2 Wohnung 12 Raum 3 Tür zum Balkon Raum 1	37 min 37 min 33 min 31 min

Zum Problem der Bestimmung der äquivalenten Normbranddauer von Bauteilen sei hier erwähnt, daß diese in erheblichem Umfang vom gewählten Vergleichskriterium und vom Indikatorbauteil abhängig ist. Je nach Vergleichskriterium, z. B. Temperaturerhöhungen, Verformungen, Festigkeitsminderungen, chemische Umwandlungen oder Abbrand- bzw. Verkohlungstiefen, ergeben sich unterschiedliche äquivalente Normbrandzeiten.

Nimmt man z. B. die Temperaturerhöhung, die ein bestimmter Punkt eines Bauteils während eines natürlichen Brandes erfahren hat, und vergleicht sie mit der Temperaturerhöhung, die derselbe Punkt im Normbrand erfahren würde, so ist der Zeitpunkt, zu dem in beiden Fällen dieselbe Temperatur erzielt wird, die äquivalente Normbranddauer. Am Beispiel eines Stahlbetonstützenausschnitts $b/d = 24/24$ konnte festgestellt werden, daß bei einem Brand mit 30 kg Holz/m^2 in Raum 1 (Versuch 1) ein Punkt, der 1 cm tief im Querschnitt liegt, eine äquivalente Normbranddauer von etwa 40 Minuten aufweist, während ein Punkt, der 6 cm von der Stützenoberfläche entfernt im Querschnitt liegt, einen Wert von ca. 55 Minuten zeigt.

Im Fall einer Brandbelastung von 60 kg Holz/m^2 in Raum 1 (Versuch 7) liegen diese Werte bei 50 min ($t = 1 \text{ cm}$) und 88 min ($t = 6 \text{ cm}$).

Die an den Stahlbetonstützen ermittelten äquivalenten Normbranddauern liegen somit deutlich höher als die mit dem BAM-Vergleichskörper ermittelten Werte. Näheres hierzu kann [38] entnommen werden.

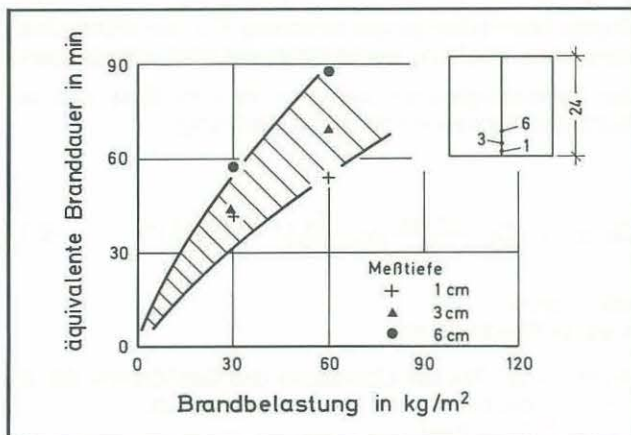


Bild 7-47: Einfluß der Meßtiefe auf die äquivalente Branddauer

7.4.7. Allgemeine Beobachtungen

Die bewohnten Räume des Gebäudes wurden durch Einzelöfen beheizt. Jede Gebäudehälfte besaß drei Schornsteine, die so angeordnet waren, daß jeder Ofen der Wohn- und Schlafzimmern unmittelbar angeschlossen werden konnte und die Öfen der kleineren Räume über kurze Verbindungsrohre Zugang zu den Schornsteinen hatten. Vor den Brandversuchen wurden die Öfen entfernt und die Kaminlöcher bzw. die Durchtrittsöffnungen durch die Rauntrennwände mit Steinwolle zugestopft und mit Mörtel raumseitig verschlossen. Da die Tapeten an den Wänden der Räume des Versuchshauses zur Brandlast nur einen unerheblichen Beitrag brachten, wurden sie nicht entfernt.

Dies hatte zur Folge, daß „nicht ordnungsgemäß“ verschlossene und übertapezierte Kaminlöcher vor den Versuchen nicht erkannt wurden. Während des Versuchs 5 stellte sich ein Kaminbrand ein, der von Raum 1 durch eine übertapezierte, nicht verschlossene Öffnung ins Schornsteininnere übertragen wurde. Im Kamin brannten Rußablagerungen. Zum Versuchsende hin traten dicke Rauchschwaden und kurzzeitig auch Flammen aus der Kaminöffnung über dem Dach aus.

In den vom Keller bis über das Dach durchgehenden Lüftungsschächten wurden mehrmals während aller Versuche, bei denen die Räume 4 und 5 beflammt waren, in Höhe der über den Brandräumen liegenden Geschosse mit dem Wanderthermoelement die Lufttemperaturen gemessen. Die Verbindung zwischen Raum und Lüftungsschacht wurde durch „Lüftungssteine“ mit etwa 1 cm breiten und 6 cm hohen Schlitzten hergestellt.

Es zeigte sich, daß bei keinem Versuch der Brand durch den Lüftungsschacht in das nächsthöhere Geschöß übertragen werden konnte, da die Temperaturen im Lüftungsschacht am Lüftungstein des über dem Brandgeschöß liegenden Raumes 80 °C in keinem Fall überstiegen. Meistens lagen sie zwischen 50 und 70 °C zum Zeitpunkt der maximalen Brandraumtemperaturen.

In Kapitel 8.1 wird die thermische Beanspruchung von Außenbauteilen, wie sie sich aufgrund der vorliegenden Meßwerte ergibt, abgehandelt. In Bild 8-2 ist graphisch dargestellt, wie sich die Brandbeanspruchung (Wärme-

stromdichte \dot{q} [kcal/m²h] F) einer von den aus dem Fenster eines brennenden Gebäudes herausschlagenden Flammen bestrahlten Fläche ändert, wenn sich ihr Abstand zum Brandraumfenster vergrößert. Demnach nimmt mit zunehmendem Abstand vom Brandraumfenster die auf eine Fläche auftreffende Strahlungsenergie schnell ab. Dennoch waren die auftreffenden Wärmestromdichten so groß, daß z. B. an Kraftfahrzeugen, die in 10 m Abstand vom Brandraumfenster entfernt standen, sich der Lack thermisch zersetzen konnte. In einigen Fällen mußte die dem Brandhaus zugekehrte Seite eines Meßwagens mit Wasser gekühlt werden, um Beschädigungen des Lackes infolge Wärmeeinwirkung zu vermeiden.

8. Untersuchungen an Außenbauteilen

8.1. Thermische Beanspruchung der Außenbauteile

In der Nähe der Brandraumöffnung treten, wie in 6.2.2 gezeigt ist, etwa die gleichen Temperaturen außerhalb des Gebäudes auf, die auch im Brandraum vorzufinden sind. Bei Windeinwirkung kann dieser Bereich beträchtliche Ausmaße annehmen. Entsprechend der räumlichen Ausdehnung und der Geometrie des strahlenden Heißgaskörpers, der Zusammensetzung (CO_2 , H_2O , Ruß) der Heißgase und deren Strömungsgeschwindigkeiten können auf Außenbauteile hohe Wärmestromdichten übertragen werden. In [30] konnte anhand umfangreicher Versuchsnachrechnungen nachgewiesen werden, daß die Brandbeanspruchung von Außenbauteilen im ungünstigsten Fall so groß werden kann, wie die Brandbeanspruchung eines Innenbauteiles; im allgemeinen ist jedoch die Brandbeanspruchung eines Außenbauteiles geringer als die eines Innenbauteiles, das dem gleichen Brand ausgesetzt wird. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhaltes sollen die Linien gleicher Wärmestromdichten, wie sie in Bild 8-1 gezeigt sind, dienen. Die Wärmestromdichten sind aus den Meßwerten des Versuchs 1 zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums (s. Bild 6-30, 20. Minute) errechnet.

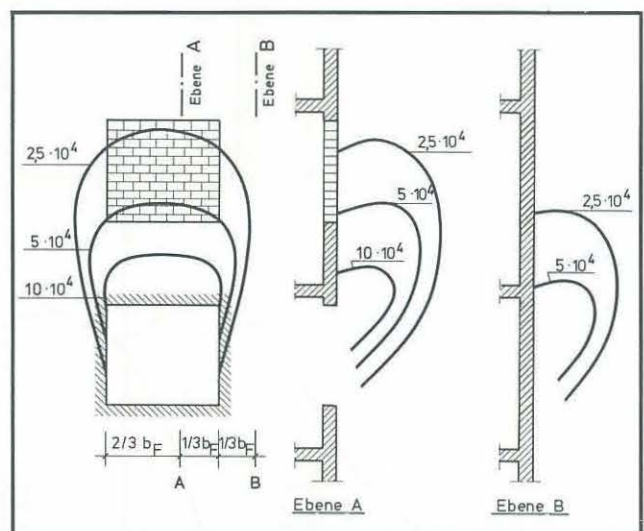


Bild 8-1: Linien gleicher Wärmestromdichten (\dot{q} [kcal/m²h])
linke Seite:
in der Ebene der Frontwand,
rechte Seite:
in einer Ebene rechtwinklig zur Frontwand
außerhalb des Fensterquerschnitts
Mitte:
in einer (gedachten) Ebene rechtwinklig zur
Frontwand im Fensterquerschnitt.

Zum gleichen Zeitpunkt wurden vom Kalorimeter im Brandraum etwa 12×10^4 (kcal/m²h) registriert. Der Bereich der Frontwand, der innerhalb der 10×10^4 kcal/m²h-Linie liegt, hat also während der Phase des maximalen Brandgeschehens eine Brandbeanspruchung erfahren, die ≥ 80 % der Brandbeanspruchung eines Innenbauteiles in Deckenhöhe ist. Nach Bild 8-1 lag die Brandbeanspruchung der Außenseite der Ausmauerung der Brüstung des über dem Brandraum befindlichen Fensters zwischen 45 und 20 % der auf ein Innenbauteil in Brandraumdeckenhöhe übertragenen Wärmestromdichte.

Eine in der (gedachten) Ebene A (Bild 8-1) befindliche Bauteiloberfläche hätte eine etwas geringere Brandbeanspruchung erfahren, da die „Schichtdicke“ der strahlenden Heißgase rechtwinklig zur betrachteten Fläche kleiner ist als rechtwinklig zur Frontwand. Liegt die betrachtete Ebene, in der sich eine Bauteiloberfläche befinden könnte, weiter von der Mittelebene des Fensters weg, wie z. B. die Ebene B in Bild 8-1, so ist dort mit einer wesentlich geringeren Brandbeanspruchung zu rechnen.

Bild 8-2 kann entnommen werden, wie sich die Brandbeanspruchung eines Flächenelementes in Höhe der Brandraumdecke, das in einer Ebene rechtwinklig zur Frontwand liegt, ändert, wenn die Ebene parallel zur Frontwand wandert. Demnach ist das Maximum der Brandbeanspruchung nicht in der Fenstermittelebene, sondern etwa im Dreittelpunkt der Fensterbreite zu erwarten. Bei den nahezu quadratischen Fenstern des Versuchshauses in Lehrte hätte

nach Bild 8-2 ein Bauteil, das sich in 3 m Abstand von Fenstermitte befunden hätte, nur noch etwa 1/5 der Brandbeanspruchung erfahren, von der es im Dreittelpunkt der Fensterbreite beaufschlagt worden wäre.

Die in Bild 8.1 und 8.2 dargestellten Wärmestromdichten wurden aus der Addition des konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeüberganges errechnet. Für den Wärmeübergang durch Strahlung wurde dabei wie folgt vorgegangen:

Der Nettoenergiestrom zwischen dem Heißgas und der Bauteiloberfläche wird durch die Gleichung

$$\dot{Q}_{G-OF} = A \cdot C_S \cdot \frac{1 + \varepsilon_{OF}}{2} \left[\varepsilon_G \left(\frac{T_G}{100} \right)^4 - A_v \left(\frac{T_{OF}}{100} \right)^4 \right] \quad (8.1)$$

beschrieben.

In dieser Gleichung ist

A [m²] = der Teil der Oberfläche des Gaskörpers, der an die betrachtete Bauteilfläche grenzt,

$C_S = 4,88 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\text{h}} \right]$ die Stephan-Boltzmann-Konstante

$A_v = A_v(p, T_G, T_{OF}, S_{gl} \cdot P_G)$ der geometrisch abhängige Absorptionsgrad

ε_{OF} = der Emissionsgrad der Stützenoberfläche

$\varepsilon_G = \varepsilon_G(P, T_G, S_{gl} \cdot P_G)$ der Emissionsgrad des Gases

T_G [K] = die absolute Temperatur des Gases

T_{OF} [K] = die absolute Temperatur der Bauteiloberfläche

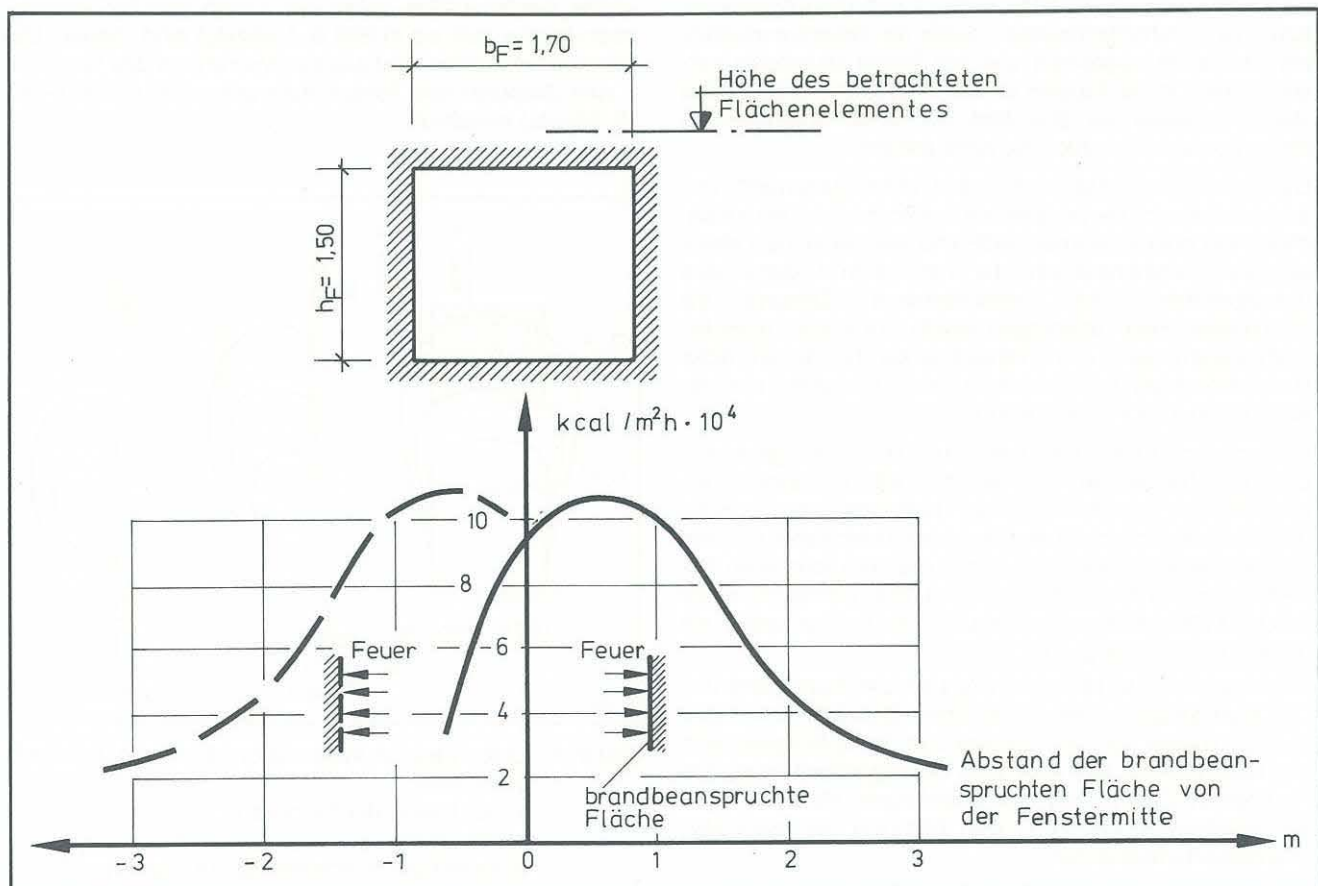


Bild 8-2: Brandbeanspruchung (\dot{q} [kcal/m²h]) einer gedachten Bauteiloberfläche, die rechtwinklig zur Frontwand steht, in Abhängigkeit ihrer Stellung zur Fenstermittelebene bei einer Temperatur im Brandraum von $\vartheta \approx 900$ °C.

Der Emissionsgrad ε_{OF} der Bauteiloberfläche kann nach Versuchserfahrungen des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig für Betonflächen mit $\varepsilon_{OF,B} = 0,9$ angenommen werden, für Stahloberflächen mit $\varepsilon_{OF,St} = 0,8 - 0,85$.

Der Emissionsgrad des Rauchgases (Heißgasgemisch mit Wasserdampf und Kohlendioxid als strahlenden Bestandteilen) bestimmt sich zu

$$\varepsilon_G = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - (\Delta\varepsilon)_G \quad (8.2)$$

Die Werte für ε_{H_2O} , ε_{CO_2} und $(\Delta\varepsilon)_G$ können dem VDI-Wärmeatlas [34] entnommen werden.

Der Wert A_v bestimmt sich zu

$$A_v = A_{v\ H_2O} + A_{v\ CO_2} - (\Delta\varepsilon)_{OF} \quad (8.3)$$

wobei
$$A_{v\ H_2O} = \varepsilon_{GOF} \left(\frac{T_G}{T_{OF}} \right) 0,45 \quad (8.4)$$

$$A_{v\ CO_2} = \left(\frac{T_G}{T_{OF}} \right) 0,65 \cdot \varepsilon_{GOF} \quad (8.5)$$

ist. Das Korrekturglied für die Gasmischung $(\varepsilon_G)_{OF}$ ist wiederum in [34] enthalten.

Streng genommen kann dieser Ansatz nur für Gaskörper gleicher Temperatur verwendet werden.

Pandaya [37] hat jedoch durch umfangreiche Versuche nachgewiesen, daß man die Strahlung von Gaskörpern ungleicher Temperatur mit für brandschutztechnische Belange ausreichender Genauigkeit (ca. 5 %) berechnen kann, wenn man als äquivalente Temperatur die über den Strahlungsweg planimetrisch mittlere Temperatur (arithmetisches Mittel) als Gastemperatur einsetzt und den Gaskörper als mit dieser Temperatur homogen strahlend betrachtet.

Deshalb wurde als „strahlungswirksame“ Temperatur T_G die mittlere Temperatur des Teiles des Gaskörpers, dessen absolute Temperatur höher ist als die der bestrahlten Bauteiloberfläche, angesetzt.

Die reine Gasstrahlung wurde bei den Holzkrippen- und Mobiliarbränden erheblich durch die Strahlung der im Rauch fein verteilten Ruß- und Ascheteilchen verstärkt. Dies wurde berücksichtigt, indem für den Emissionsgrad des Rauchgases angesetzt wurde:

$$\varepsilon_{G+R} = \varepsilon_G + \varepsilon_R - \varepsilon_G \cdot \varepsilon_R \quad (8.6)$$

Dabei ist

ε_G = der Emissionsgrad der reinen Gasstrahlung,

ε_R = der Emissionsgrad der Rußstrahlung.

Die Werte ε_R können für unterschiedliche Rußbeladungen R [kg/m^3] dem VDI-Wärmeatlas entnommen werden. Die ε_{G+R} -Werte schwankten dabei, je nach Ort und Richtung der betrachteten Bauteiloberfläche und je nach Ausdehnung des Heißgasstromes während des voll entwickelten Brandes, zwischen 0,3 und 0,7.

Wie Vergleichsrechnungen, die anhand der Ergebnisse der Kalorimetermessungen durchgeführt wurden, zeigen, sind diese Werte geringfügig kleiner als die Emissionswerte des zugehörigen Brandraumes.

Der konvektive Wärmeübergang berechnet sich zu

$$\dot{q}_K = \alpha_K (\vartheta_G - \vartheta_{OF}) \quad [\text{kcal/m}^2\text{h}] \quad (8.7)$$

Es bedeuten

ϑ_G [°C] die Gastemperatur
 ϑ_{OF} [°C] die Oberflächentemperatur des Bauteils
 α_K [$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$] der Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient α_K kann in der Größenordnung zwischen 10 und 30 [$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$], je nach den Bedingungen des Brandes und des brandbeanspruchten Bauteiles, liegen.

Der α_K -Wert läßt sich nach den Gesetzen der freien bzw. erzwungenen Konvektion errechnen, kann aber auch überschlägig nach Schneider [38] nach der Näherungsformel

$$\alpha_K = (7,38 + 0,00224 \cdot \vartheta) \cdot W^{0,5} \quad (8.8)$$

ϑ [°C] Temperatur des Heißgases

W [m/s] Geschwindigkeit der Heißgase

bestimmt werden.

Diese Näherungsformel zeigt recht deutlich, daß die Geschwindigkeit der Heißgase der entscheidende Einflußfaktor des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ist. Die Temperatur der Heißgase beeinflusst den Wert des Wärmeübergangskoeffizienten nur geringfügig.

Wie sich der Gesamtwärmestrom, der auf ein Außenbauteil übertragen wird, aus einem konvektiven und radiativen Anteil zusammensetzt, sei am Beispiel einer Außenstützenfläche gezeigt, die dem Brandraum mit einem Abstand von $a = 60$ cm zugekehrt ist (Bild 8-3).

Dieses Ergebnis zeigt sehr deutlich den hervorragenden Anteil der Strahlung am Gesamtwärmeübergang im Bereich hoher Temperaturen. In den hochliegenden Bereichen mit geringer Heißgastemperatur ist der Anteil der Strahlung am Wärmeübergang immer noch geringfügig höher bzw. gleich groß wie der konvektive Teil.

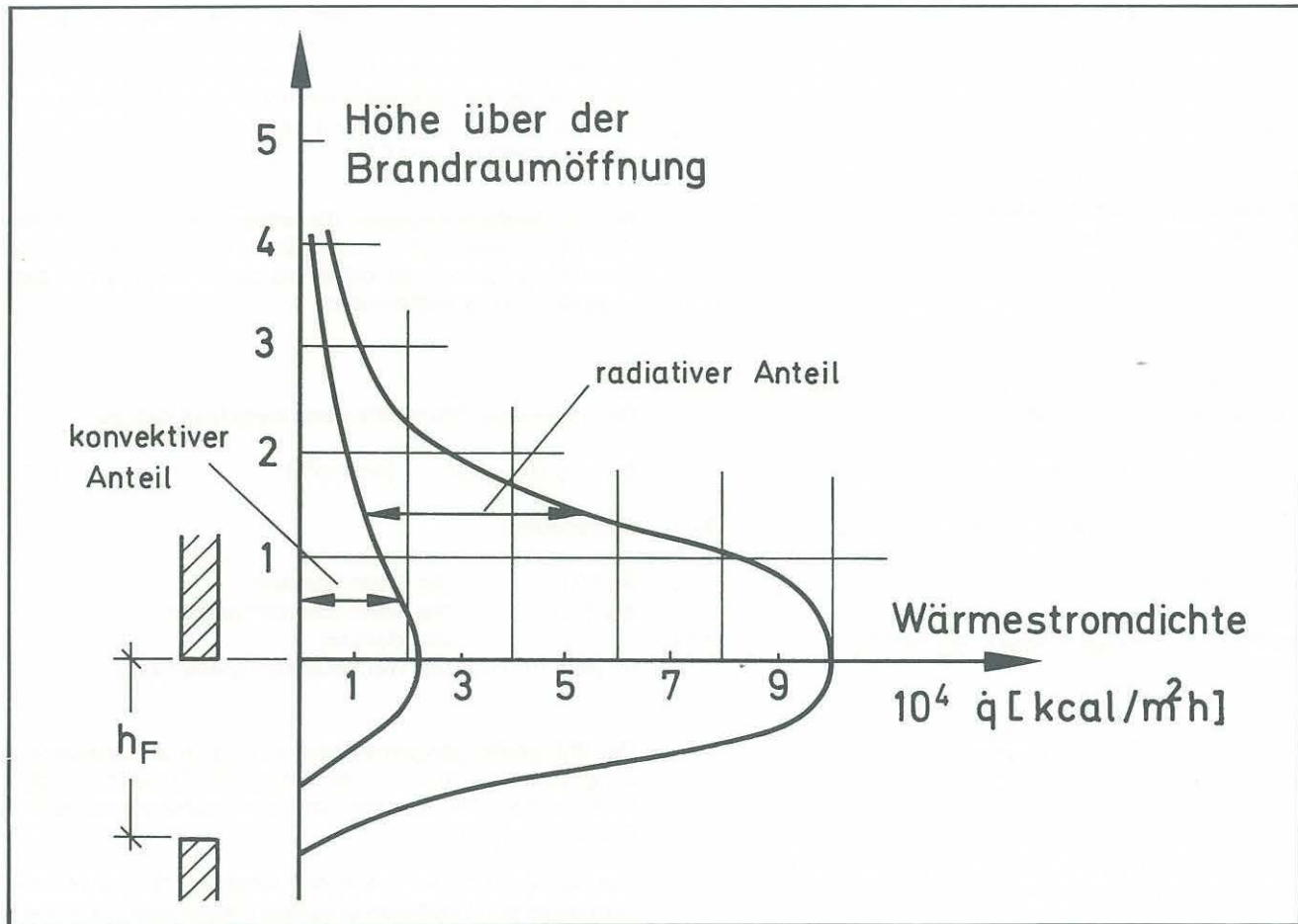


Bild 8-3: Verlauf der Wärmestromdichte einer dem Brandraum zugekehrten Außenstützenfläche zum Zeitpunkt der maximalen Brandraumtemperatur ($\vartheta_{Br} \approx 900^\circ\text{C}$).

Näheres hierzu wird in Kapitel 8.4 abgehandelt.

Sobald Wind auf das Brandgeschehen vor der Fassade Einfluß nimmt, kann sich die Brandbeanspruchung von Außenbauteilen quantitativ und qualitativ in hohem Maße ändern. Die Feuereinwirkung läßt sich dann allgemein nicht mehr darstellen. Windeinwirkungen auf die untersuchten Außenbauteile werden deshalb in den Kapiteln 8.2 bis 8.6 gesondert beschrieben.

8.2. Brandverhalten der Gebäude-Außenwand

Bei den Versuchen, bei denen die aus dem Fenster heraus-schlagenden Flammen nicht durch Windeinflüsse verlängert oder abgelenkt wurden, hat sich gezeigt, daß die Außenwand auf eine Höhe von etwa 1,20 m von außen her sehr stark vom Feuer beansprucht wurde. In dem Bereich, der in dem Bild 8-1 von der $5 \times 10^4\text{-kcal/m}^2\text{h}$ -Linie eingegrenzt wird, wurden mittels Wanderthermoelement während des Brandes und auch noch kurze Zeit danach Oberflächentemperaturen $\geq 500^\circ\text{C}$ gemessen. Dieser Bereich ist in seiner Ausdehnung etwa 20 cm größer als die Fläche, die oberhalb der Brandraumöffnung, aus der die Flammen herausschlugen, rußfrei blieb (z. B. Bild 8-4, untere Brandraumöffnung, Raum 1).

Innerhalb dieses Bereiches wurde der Außenputz stark zermürbt und aufgeweicht, blieb jedoch auf dem Mauerwerk haften. Nur vor den Stahlbetonstützen, wo eine Holzwolle-Leichtbauplatte (Heraklith) als Putzträger diente, fiel er ab (Bild 8-4, 8-24). In den Zonen geringer Wärmebeaufschlagung

wurde die Außenwand zwar rußgeschwärzt, doch weitere Veränderungen, die auf thermische Einflüsse von der Außenseite her zurückzuführen wären, konnten bei allen 13 Versuchen nicht festgestellt werden.

Windeinwirkungen, welche das Brandgeschehen vor der Fassade vergrößerten, führten zu keinen schwereren Schäden im Nahbereich der Brandraumöffnungen. Wohl aber wurde die Zone, in der Wärmestromdichten $\geq 10 \cdot 10^4 \text{kcal/m}^2\text{h}$ auf die Außenfläche der Frontwand einwirkten, in ihrer Fläche vergrößert bzw. auch teilweise auf die Wandflächen neben den Fenster- bzw. Türleibungen ausgedehnt.



Bild 8-4: Wirkungen des Feuers auf die Außenwand des Versuchshauses

Faßt man alle Beobachtungen hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Außenwandfläche zusammen, so kann festgestellt werden:

1. Die mit Wanderthermoelementen gemessene Maximaltemperatur der Außenwandfläche im Bereich des Fenstersturzes lag bei etwa 800 °C.
2. Eine Temperaturerhöhung auf ≥ 500 °C konnte ohne Windeinfluß bis zu 1,50 m und mit Windeinfluß bis zu 2,10 m über Oberkante Brandraumöffnung festgestellt werden.
3. Temperaturen bis zu 500 °C wurden in einer horizontalen Entfernung von bis zu 90 cm neben dem Fensterrand und oberhalb der Oberkante der Fensteröffnung in einem horizontalen Abstand bis zu 1,40 m bei Bränden mit Windeinwirkung gemessen.
4. Zerstörungen oder wesentliche Veränderungen des Putzes infolge thermischer Einflüsse konnten nur bei Außenwandtemperaturen ≥ 500 °C festgestellt werden.
5. Unterhalb der Unterkante der Brandraumöffnungen blieben die Temperaturen auf Werten von ≤ 80 °C.

Wie bereits in Kap. 7.1 festgestellt, übertragen sich die Horizontaldehnungen der Stahlbetondecken zum Teil auch auf die Außenwände. Da die Deckenverschiebungen die Größenordnung von einigen Zentimetern erreichen können, stellen sich in den Wänden Risse ein. Die größten Rißweiten wurden in den Außenwänden festgestellt. Die Rißweiten betrugen auf der Außenseite der Außenwände bis zu 2,5 cm (Bild 8–5) und auf der Innenseite bis zu 1,3 cm. Während der Brände strömten oftmals Rauch und Wasserdampf aus den Rissen aus.



Bild 8–5: Riß in der Außenwand (Südseite)

Besonders an den Gebäudeecken, wo sich die Decken ohne Behinderung durch angrenzende nichtbeheizte Felder frei dehnen konnten, traten vermehrt Risse in den Außenwänden auf. Während der Versuche 2, 3, 4 und 8 bildeten sich etwa ab der 15. Minute horizontale Risse im Mauerwerk der Außenwände im Bereich der sich dehnenden Decken. Ab der 20. bis 25. Minute zeigten sich auch senkrechte Risse, deren Ursprung stets im Horizontalriß lag (Bild 8–5). Bei Versuch 8, bei dem die Brände in zwei übereinander liegenden Geschossen kurz nacheinander abliefen und das untere Brandgeschoß mit der hohen Brandlast von 90 kg Holz/m² belegt war, schob sich die Nordostecke des Gebäudes in Höhe der Decke der Wohnung 8 um etwa 5 cm diagonal nach außen. In der Außenwand traten dort nur Risse mit einer Weite von $d \leq 0,7$ cm auf. Die Hauskante (auf Grenze Nordwand/Ostwand) verkrümmte sich jedoch so stark, daß es mit bloßem Auge sichtbar wurde (Bild 8–7).

Der Verkrümmung überlagerte sich noch die thermische Dehnung der Innenseite der Brandraumwände. Diese nahmen in der oberen Wohnung, die im 3. OG des Gebäudes lag, große Ausmaße an, da als Auflast auf den Wänden nur das Eigengewicht des Daches und des 4. OG wirkten.

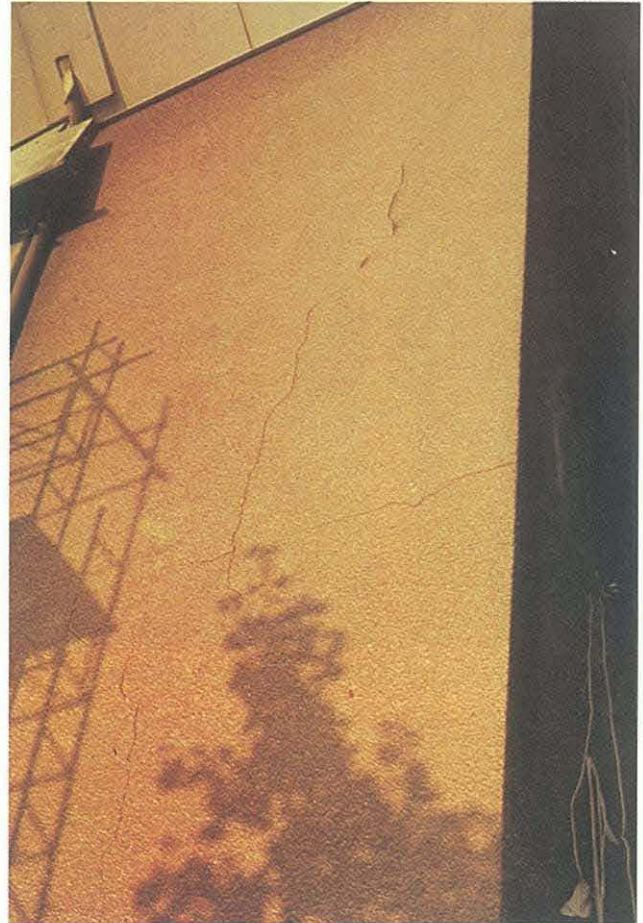


Bild 8–6: Horizontalriß in Höhe der Decke über dem Brandraum und daran anschließende Vertikalrisse

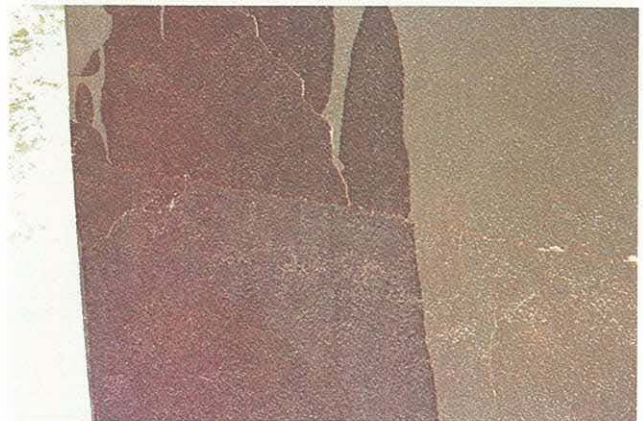


Bild 8–7: Die Nordostecke des Gebäudes verkrümmte sich so stark, daß es mit bloßem Auge sichtbar wurde



Bild 8-8: Horizontalriß in Fuge des Bimsbetonmauer



Bild 8-9: Schrägrisse im Bereich der Gebäudedecken.

Als Folge davon zeigten sich an der Gebäudeecke horizontale Risse, jeweils in Höhe der Fuge des Bimsbetonmauerwerks (Bild 8-8). Im Gegensatz hierzu zeigte sich an der Südostecke des Hauses nur ein unbedeutender waagerechter Riß in Höhe der Decke über Wohnung 8. Von der Oberkante des Brandraumfensters, also unterhalb des mit der Decke monolithisch verbundenen Fenstersturzes (Raum 1, Wohnung 8, Ostseite), und von der Südfront her liefen Risse unter ca. 45 – 60° in der Eckkante zusammen (Bild 8-9). Die „steife“ Südostecke hat die Verformung der Decke über Wohnung 8 über mehr als volle Geschoßhöhe mitgemacht und sich vom übrigen Mauerwerk, das durch die „kalte“ Decke über der Wohnung 4 gehalten wurde, abgesichert. Die Risse hatten eine Weite von $d \sim 1,2$ cm.

Trotz vieler Risse und der brandraumseitig festzustellenden etwa 2 cm tiefen thermisch bedingten Zermürbung des Mauerwerks war die Standsicherheit der Außenwände nach den 13 Versuchen an keiner Stelle gefährdet.

8.3. Brandverhalten der vorgehängten Kunststofffassade

An die Nordseite des Gebäudes war vor den Räumen 4 und 5 eine Fassade aus Hart-PVC vorgehängt worden, deren Brandverhalten während der Versuche 01 und 02 beobachtet wurde. Um praxisgerechte Bedingungen zu schaffen, wurde auf die Außenseite der Außenwand eine Wärmedämmung aus schwerentflammbarem Polystyrolschaum aufgeklebt. Als Träger der Kunststoff-Fassadenplatten dienten Profileisen aus einer Aluminiumlegierung (Schmelzpunkt bei $\vartheta \sim 680^\circ\text{C}$), die an die Hauswand angedübelt waren (Bild 8-10 kann der Aufbau der Wand und das Profil der



Bild 8-10: Kunststofffassade nach dem Versuch 01

PVC-Fassadenplatten entnommen werden). Links neben und über der Brandraumöffnung sind Reste der Polystyrolschaumplatte zu erkennen. Im Bereich der Fenster waren die Platten und Aluminiumleisten ausgeschnitten. Eine Bekleidung der Fensterlaibung war nicht vorhanden. Die aus dem Brandraum ausströmenden Heißgase sollten die Möglichkeit haben, hinter den Fassadenplatten, also im Hohlraum zwischen dem Styropor und der Hochsicke des PVC-Profiles, aufzusteigen. Während der Versuche 01 und 02 zeigte sich schon kurz nach dem Zünden (ab der 2. Minute der Brandbeanspruchung), daß die Fassadenplatten beim Auftreten erhöhter Temperaturen (Bild 8-11) (Heißgastemperatur $\vartheta \approx 150^\circ\text{C}$) sehr weich werden und die Profilierung verlorengelht. Bei einer mittleren Heißgastemperatur von etwa 300 – 500 °C, also noch vor dem Auftreten leuchtender Flammen, fielen bei beiden Versuchen die erwärmten Teile ab (Bild 8-12).



Bild 8-11: Drei Minuten nach dem Zünden des Feuers hat die Fassade über der Brandraumöffnung ihre Profilierung verloren. Die mittlere Heißgastemperatur vor der Frontwand war zu diesem Zeitpunkt ungefähr 200 °C (Versuch 02)



Bild 8-12: 5 Minuten nach dem Zünden ist die Hart-PVC-Fassade im Bereich über dem Brandraumfenster abgefallen. Heißgastemperatur vor der Frontwand $\vartheta \sim 400$ °C (Versuch 02)

Zu diesem Zeitpunkt war die Polystyrolschaumschicht bereits vermutlich durch Erwärmung durch die hinter den Kunststoffplatten aufgestiegenen Heißgase, abgeschmolzen. Zum Zeitpunkt des Beginns der Phase des vollentwickelten Brandes im Brandraum, also dem Auftreten höherer Temperaturen und leuchtender Flammen, wurde die Außen-

seite der Hauswand bereits direkt beflammt, da im Bereich des Heißgasstromes von der Kunststoffassade nur noch die Unterkonstruktion aus Aluminium vorhanden war. Bei Versuch 02 schmolzen die Aluminiumleisten in der Nähe des Fenstersturzes; in einer Höhe von $h > 50$ cm über dem Fenstersturz blieben sie unversehrt.

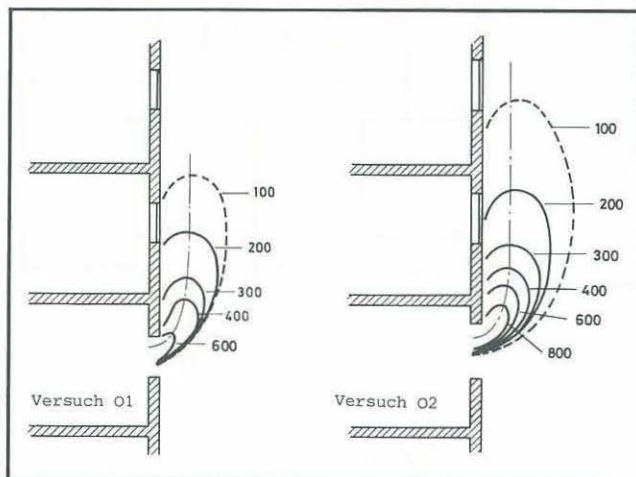


Bild 8-13: Temperaturfeld vor der Fassade zum Zeitpunkt der maximalen Temperatur im Brandraum. Links Versuch 01, Mitte Versuch 02, rechts Flammenbild bei Versuch 02



In Bild 8–13 ist die Temperaturverteilung zum jeweiligen Maximum des Temperaturgeschehens im Brandraum dargestellt, wie sie vom kleinen Meßgerüst und den zusätzlich eingesetzten Wanderthermoelementen festgestellt wurde. Im Vergleich zum Temperaturfeld ohne Einfluß einer Fassadenbekleidung (siehe Bild 6–37) fällt auf, daß das Gebiet mit Temperaturen um 200 °C sich etwa über dieselbe Höhe erstreckt, der Hochpunkt der 500 °-Isotherme aber wesentlich niedriger liegt. Es kann festgestellt werden, daß die vorgehängte Fassade nur dort zerstört wurde, wo sie erhöhten Temperaturen ausgesetzt war (Bild 8–14). Sie leitete den Brand offensichtlich nicht weiter. Auch während der folgenden Versuche brannten die Reststücke der PVC-Fassade nur dort ab, wo sie vom Brand direkt getroffen wurde.



Bild 8–14: Zustand der Hart-PVC-Fassade nach den Versuchen 01 und 02

8.4. Brandverhalten von Außenstützen

Als Außenstützen kamen sowohl Stahlbeton- als auch Stahlstützen zum Einsatz. Die Stahlbetonaußenstützen hatten

einen Querschnitt von 24 × 24 cm und waren mit 8 Ø 18 III als Längsbewehrung versehen. Die Betondeckung der Bewehrung betrug 4 cm (bezogen auf die Achse der Längsstäbe). Der Beton hatte die Güte Bn 250. Die Stützen waren 8 m lang.

Als Stahlausenstützen wurden 8 m lange Vollwand-Profile IPB 240 und 2,5 m lange Hohlprofile 220 × 220 × 10 verwendet. Außerdem wurden noch 5 m lange I 140 als Stahlausenbauteile eingesetzt.

Die 8 m langen Außenstützen standen auf einem 50 cm hohen gemauerten Podest in Geländehöhe, jeweils in der Mittelebene der Brandraumfenster oder der Balkone.

Die geschoßhohen Rechteckrohre wurden zwischen die Balkonplatten gestellt. Die über 2 Geschosse reichenden I 140-Profile wurden jeweils in der Mittelebene des Brandraumfensters so vor die Fassade montiert, daß sich der Fußpunkt etwa in Höhe der Brüstung des Brandraumfensters befand.

Der Achsabstand der Außenstützen zur Fassade variierte von Versuch zu Versuch zwischen 40 und 80 cm. Er ist in den Anlagen in der Legende zu den Diagrammen wiedergegeben.

Wie bereits die Temperatur- und Geschwindigkeitsmeßergebnisse des Heißgasstromes erwarten ließen, zeigte sich, daß die größte Brandbeanspruchung der Außenstützen – Windeinflüsse ausgeschlossen – in einem Bereich liegt, der im oberen Drittel der Brandraumöffnung beginnt und sich bis wenig oberhalb der Brandraumdecke erstreckt (Bild 8–17).

Die Bilder 8–16 und 8–17 lassen auch recht gut erkennen, daß die Außenstütze vom oberen Drittel der Brandraumöffnung an aufwärts allseitig und in den höherliegenden Bereichen sogar allseitig gleichmäßig beflammt wird.

Geht man von über mehrere Geschosse durchlaufenden Außenstützen aus, so ist dies auch der Ort der maximalen statischen Beanspruchung, da sich am Anschluß Stütze/Riegel im Brandfall dem Knotenmoment aus Eigengewicht und Verkehrslast der Decke über dem Brandraum noch ein Moment überlagert, das aus der thermischen Dehnung der Brandraumdecke herrührt.

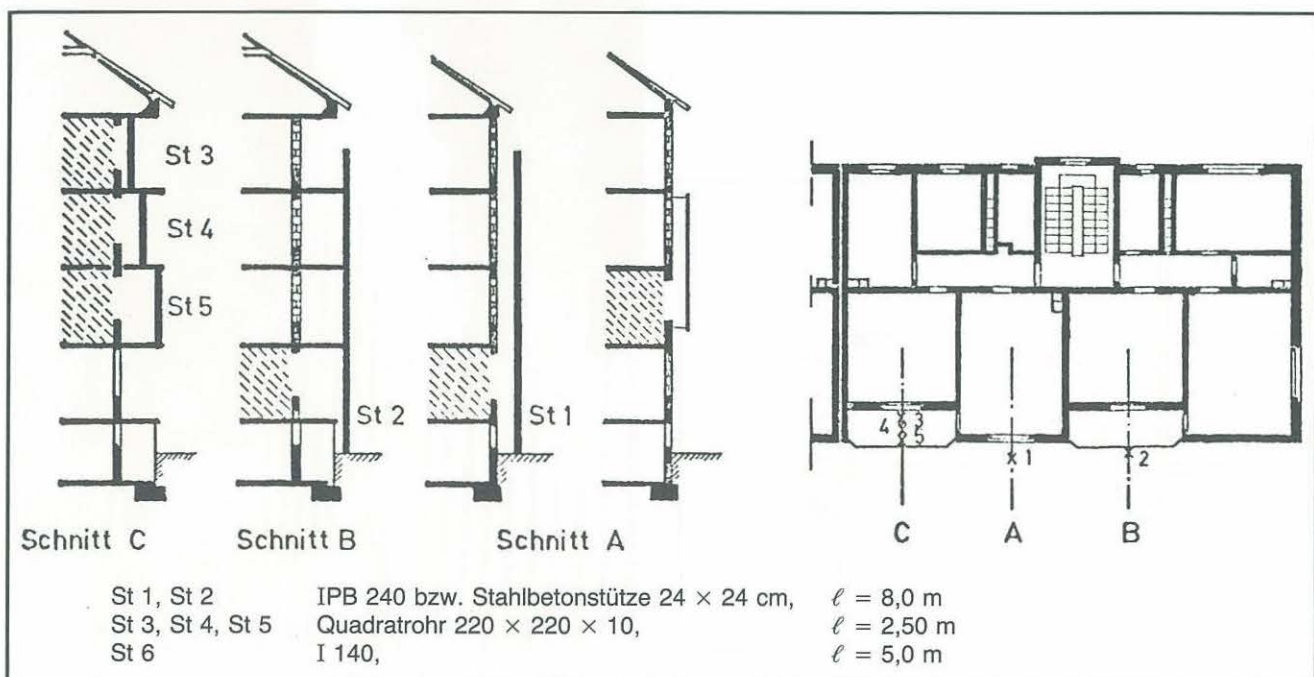


Bild 8–15: Stellung der Außenstützen bei den einzelnen Versuchen.



Bild 8-16: Beflammung einer Außenstütze ohne Windeinfluß (Versuch 1)

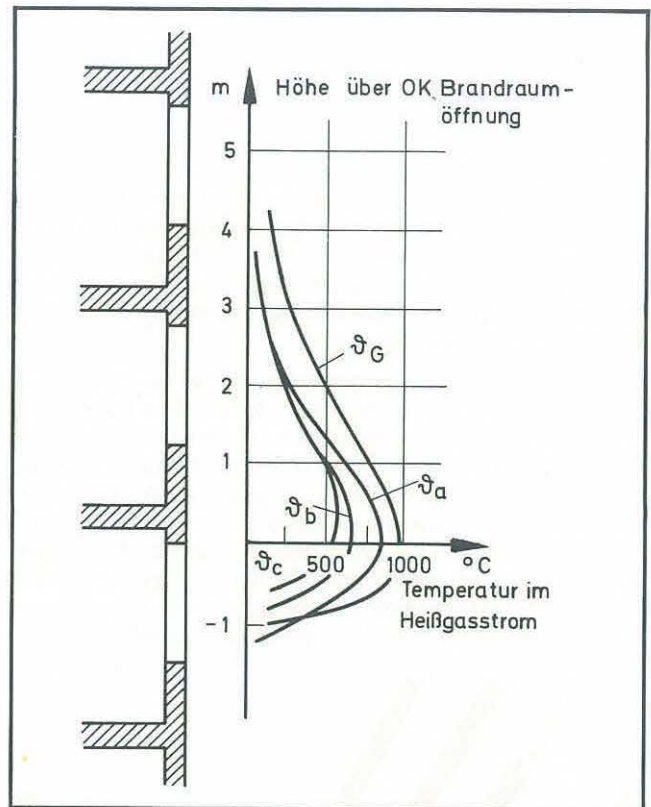


Bild 8-17: Maximaltemperaturen, die während Versuch 1 aufgetreten sind
 θ_G auf der Achse des Heißgasstromes
 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ auf der Oberfläche der Stahlbetonaußenstütze (Bezeichnung der Seiten siehe Bild 8-18)

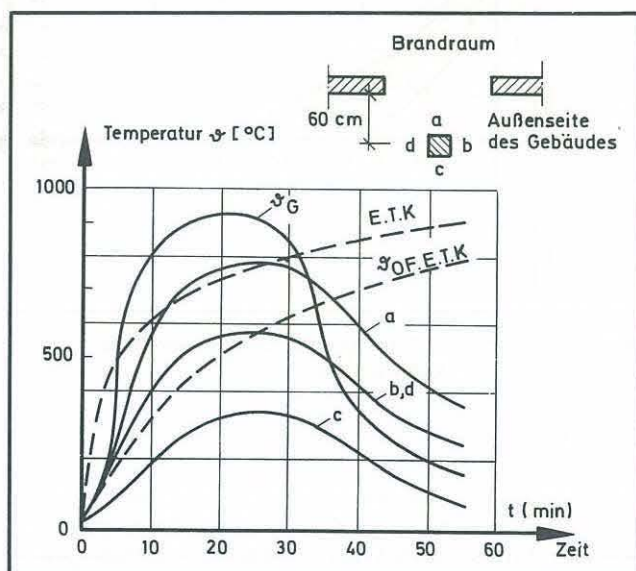


Bild 8-18: Temperatur-Zeit-Verlauf der Heißgase und der Oberflächen einer Stahlbetonaußenstütze (Versuch 1) Höhe des waagerechten Schnittes: 20 cm unter OK Brandraumfenster

Der Verlauf der Oberflächentemperatur in einem Schnitt 20 cm unterhalb des Fenstersturzes während des Brandes geht aus Bild 8-18 hervor. Ein Vergleich mit den während eines Normbrandes an einer allseitig beflamten Stütze aufgetretenen Temperaturen $\theta_{OF,ETK}$ zeigt die kurzzeitig deutlich höhere Brandbeanspruchung der dem Brandraum zugekehrten Außenstützenfläche im natürlichen Brand.

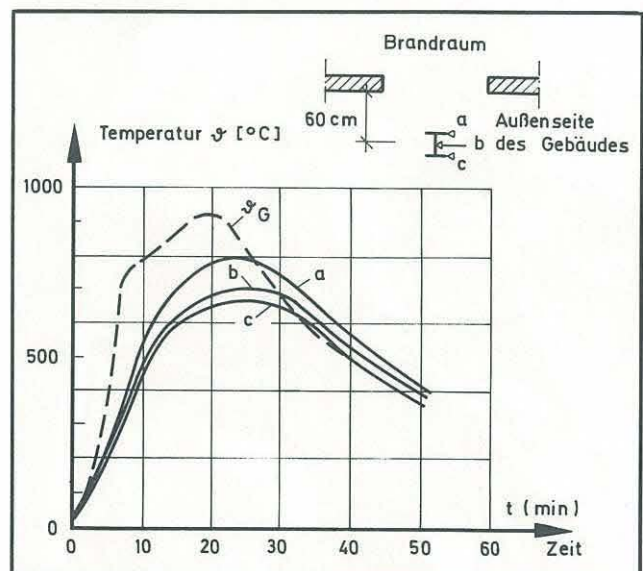


Bild 8-19: Temperatur-Zeit-Verlauf der Heißgase und der Oberflächen einer Stahlsäule (Versuch 5) Höhe des waagerechten Schnittes 20 cm unter OK Brandraumfenster

Eine Stahlsäule IPB 240, die während Versuch 5 etwa dem gleichen Temperaturzeitverlauf des Brandes ausgesetzt war wie die Betonaußenstütze im Versuch 1, zeigte im Querschnitt 20 cm unterhalb des Fenstersturzes die in Bild 8-19 dargestellten Temperaturen.

Aus den vorliegenden und sämtlich in der Anlage zu diesem Bericht wiedergegebenen Meßergebnissen können nun Wärmeübergangsbedingungen auf Außenstützen formuliert werden.

Es hat sich gezeigt, daß der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_K während der Testbrände nur in engen Grenzen schwankte. Die Erklärung hierfür ist, daß dieser, wie bereits in 8.1 festgestellt, nur geringfügig von den stark wechselnden Rauchgastemperaturen abhängt, die Heiß- bzw. Rauchgasgeschwindigkeit jedoch über einen weiteren Temperaturbereich an einem bestimmten Ort ihren Wert während des Brandes beibehält.

Im Bereich der Brandraumöffnung ist der α_K -Wert etwas größer als in den höher liegenden Zonen. Dies liegt daran, daß an der Brandraumöffnung die Außenstütze umströmt wird, während sich weiter oben die aufsteigenden Heißgase parallel zur Stützenoberfläche bewegen (siehe Bild 8-16 und Bild 8-20). Wie aus Bild 8-23 ersichtlich, ist der Nachlauf der Strömung hinter einer Stütze mit I-Profil mehr verwirbelt als im Falle einer Stütze mit quadratischem Querschnitt. Der α_K -Wert ist deshalb beim I-Profil etwa 30 % größer als beim quadratischen Querschnitt.

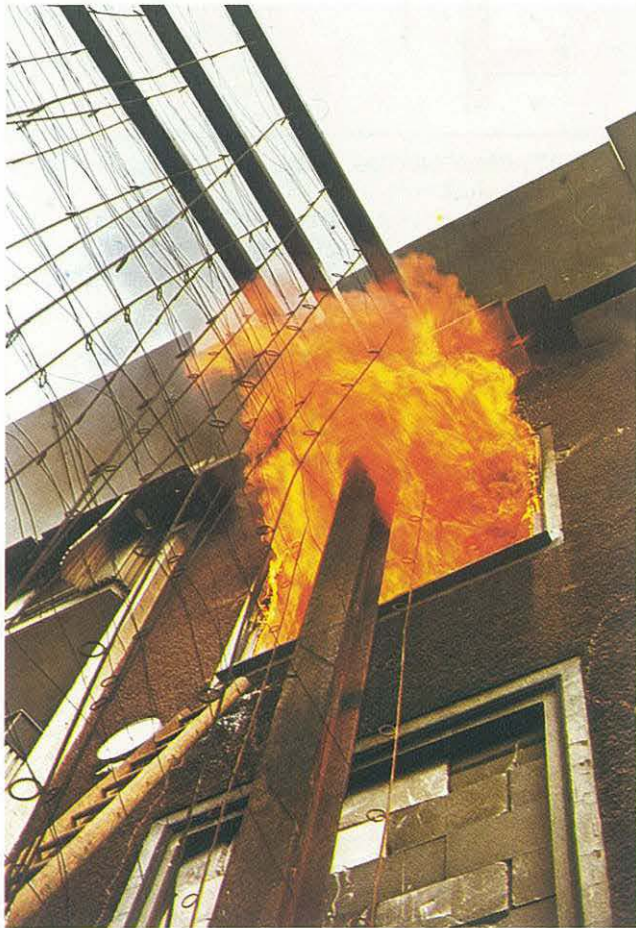


Bild 8-20: Im Bereich der Brandraumöffnung wird die Außenstütze von den Heißgasen umströmt

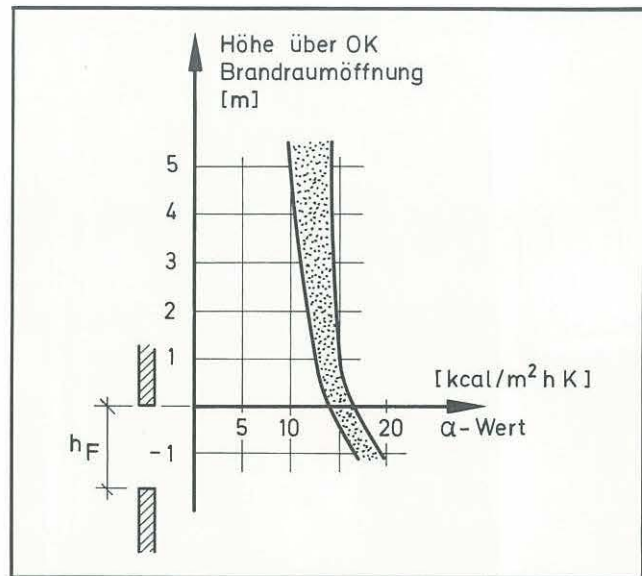


Bild 8-21: Größenordnung des Wärmeübergangskoeffizienten α_K längs einer Außenstütze

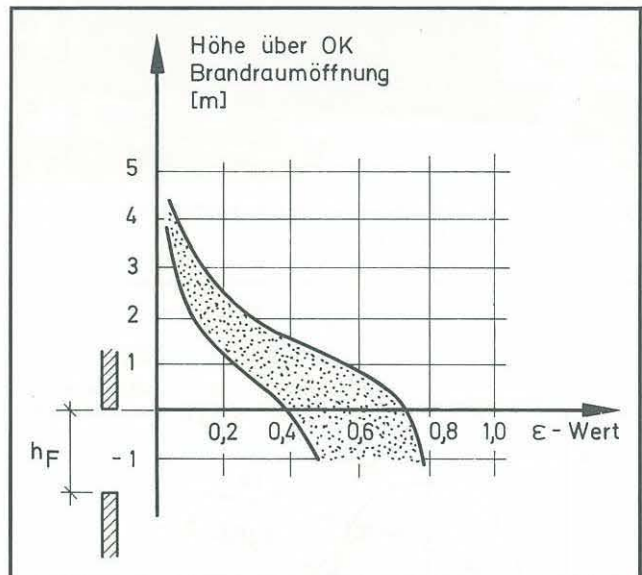


Bild 8-22: Größenordnung des Emissionswertes ϵ längs einer Außenstütze

Der Verlauf des α_K -Wertes längs der Stützenachse ist in Bild 8-21 dargestellt. In wesentlich weiteren Grenzen ändert sich der Emissionsgrad ϵ der strahlenden Heißgase in Abhängigkeit von der betrachteten Höhe über der Brandraumöffnung und auch in Abhängigkeit ihrer im Laufe des Brandes unterschiedlichen Zusammensetzung (Bild 8-22).

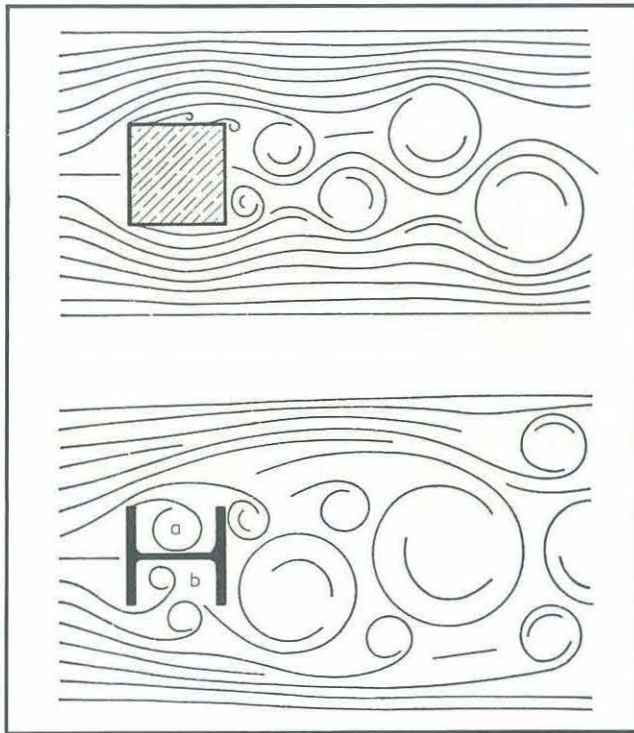


Bild 8-23: Grundriß des Strömungsbildes, wie es bei den Versuchen mit einer Stahlbetonstütze $b/d = 24/24$ cm und einer Stahlstütze IPB 240 im Bereich der Brandraumöffnung beobachtet wurde

Durch Mischung mit der Umgebungsluft nimmt der Gehalt an strahlenden Bestandteilen (CO_2 , H_2O , Ruß) im Heißgas mit zunehmender Höhe über dem Brandraum ab. Da die Ausdehnung des Heißgasstromes rechtwinklig zur Stützenachse (Flammendicke) mit zunehmender Höhe nicht wesentlich größer wird, nimmt das Produkt $p \cdot s$ aus Schichtdicke s und Partialdruck p der strahlenden Gase mit zunehmender Entfernung des betrachteten Horizontalschnittes von der Brandraumöffnung sehr schnell ab.

Das Produkt $p \cdot s$ ist entsprechend dem Beer'schen Gesetz

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot p \cdot s} \quad (8.8)$$

I = Intensität der Strahlung [$\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$]

p = Partialdruck des Gases

s = Strecke entlang der Strahlung, die emittiert oder absorbiert wird (Schichtdicke)

k = Konstante

nach der Temperatur der Rauchgase die wesentliche Einflußgröße des radiativen Wärmeüberganges.

Der starke Abfall des strahlungsbedingten Wärmeüberganges mit zunehmender Höhe des betrachteten Außenstützenelementes über dem Brandraum ist also nicht nur auf die nach oben hin abnehmende Rauchgastemperatur, sondern auch auf die Abnahme des Gehaltes an CO_2 , H_2O und Ruß pro Volumeneinheit Rauchgas zurückzuführen.

Wenn nun Windeinwirkungen, wie sie in 6.2.5 gezeigt sind, das Temperatur- und Strömungsfeld vor der Fassade beeinflussen, kann sich die Beflammung der Außenstützen erheblich ändern.

Ein Wind, der den aus dem Brandraumfenster austretenden Heißgasvolumenstrom vergrößert, kann z. B. bewirken, daß

eine Außenstütze schon ab der Unterkante des Brandraumfensters allseitig vom Feuer umgeben wird (vgl. Bild 8-20 und Bild 6-53).

Ein parallel zur Fassadenebene wehender Wind kann zur Folge haben, daß sich der in Höhe des über dem Brandraum liegenden Geschosses befindliche Außenstützenabschnitt einer Brandbeanspruchung entzieht, während weiter unten die allseitige Feuerbeanspruchung erhalten bleibt (vgl. Bild 6-49).

Eine mit großem Abstand zur Ebene des Brandraumfensters stehende Außenstütze kann sich unter Windeinfluß nahezu gänzlich einer Brandbeanspruchung entziehen und lediglich leicht aufwärmen (vgl. hierzu Bild 6-55).

Im Falle der Außenstützen, die zwischen den Balkonplatten standen, zeigte sich, daß entsprechend dem Temperaturfeld des Heißgasstromes nur der obere Teil, vom Stützenkopf an abwärts bis etwa 60 – 80 cm unterhalb der Balkonplatte, einer hohen Brandbeanspruchung ausgesetzt war.

Bild 8-24 läßt die Grenze zwischen stark beheiztem, oberem Teil und nur schwach erwärmtem, unteren Teil der $220 \times 200 \times 10$ cm Quadratrohrstütze erkennen.

Der obere Teil, der sich bis $\sim 800^\circ\text{C}$ aufheizte, zeigte Anlaßfarben; der untere Teil, der sich nur auf etwa 200°C erwärmte, wies nach dem Versuch keine sichtbaren Veränderungen der Stahloberfläche auf.



Bild 8-24: Der Kopf der Außenstütze aus Stahl $220 \times 220 \times 10$ zeigte Anlaßfarben. Etwa 80 cm unterhalb des Kopfes waren keine Veränderungen der Stahloberfläche mehr festzustellen

Eine Quadratrohrstütze $220 \times 220 \times 10$, die mit einem schäumenden Brandschutzanstrich (Fabrikat „Tep-pitex“, Desowag-Bayer) versehen war, schäumte ebenfalls in dem Bereich auf, in dem die Stahltemperaturen auf mehr als 200°C anstiegen.

Die Außenstützen waren so aufgestellt, daß sie sich frei verformen konnten. Ihre Verkrümmungen und Verlängerungen wurden während der Brandversuche mittels Theodoliten beobachtet. Unmittelbar nach dem Versuch wurden die Verformungen der noch nicht erkalteten Stützen mittels Meßplatten und Meßband kontrolliert. Es zeigte sich, daß die Außenstützen in den Bereichen, in denen einander gegenüberliegende Seiten ungleich beheizt wurden, sich zum Teil erheblich verkrümmten.

Bild 8-25 zeigt die Verkrümmung der Stahlbetonaußenstütze, die bei Versuch 1 mit 60 cm Achsabstand zur Frontwand in der Fenstermittelebene stand. Es ist deutlich

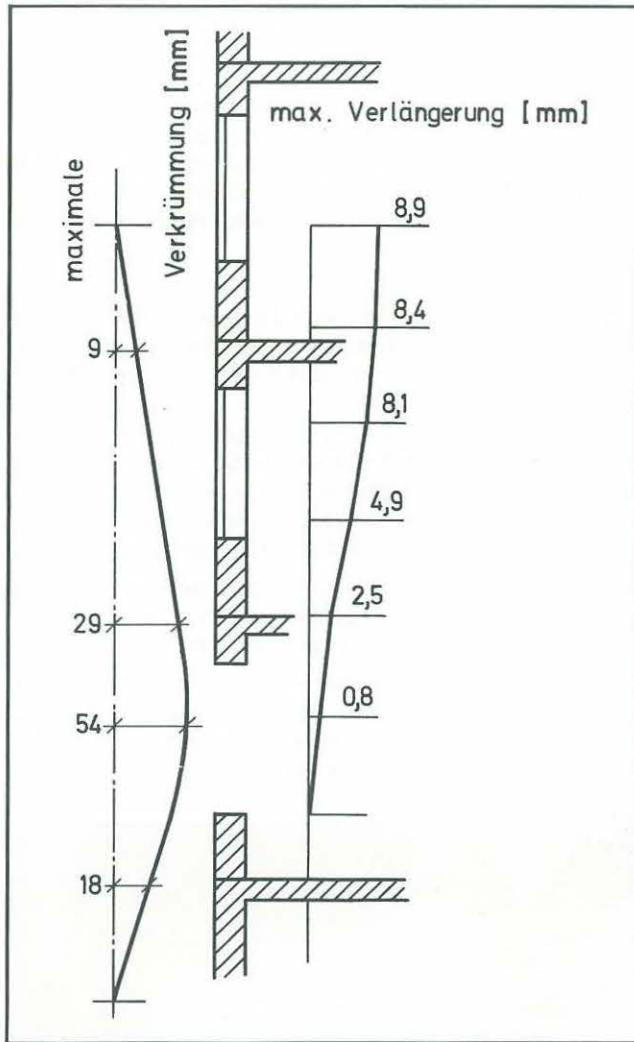


Bild 8-25: Maximale Verformungen der Außenstütze (Versuch 1)

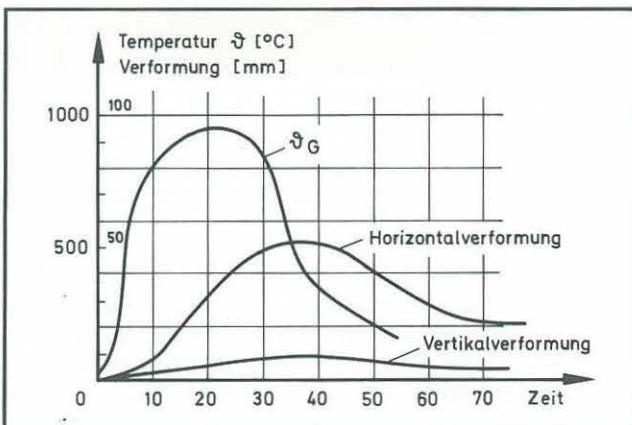


Bild 8-26: Zeit-Temperatur-Verlauf der Verformungen

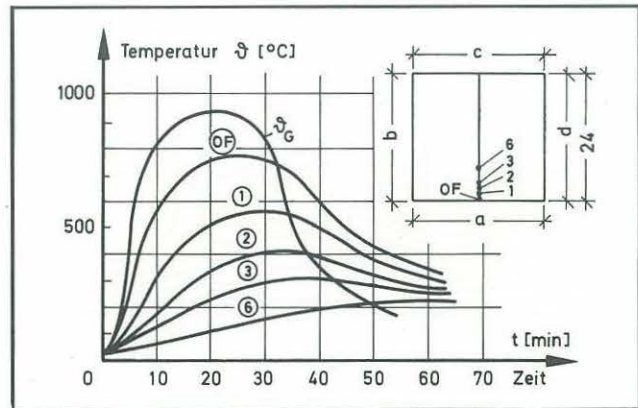


Bild 8-27: Zeit-Temperatur-Verlauf einzelner Punkte im Querschnitt und an der Oberfläche der Stahlbetonstütze

zu erkennen, daß sich die Stütze nur vor der Brandraumöffnung merklich krümmte. Die größte Krümmung stellte sich etwa in Höhe der Fenstermitte ein, wo sich die Stütze brandraumseitig stark aufheizte, auf der dem Brandraum abgekehrten Seite jedoch nur leicht erwärmt wurde.

Da oberhalb des Fenstersturzes die Außenstütze nahezu allseitig gleichmäßig beflammt wurde, zeigte sich dort keine Verkrümmung mehr, sondern nur noch eine Verlängerung. Die maximale Verlängerung wurde mit $\ell = 2,4 \text{ mm/m}$ im Stützenteil oberhalb des Sturzes des Brandraumfensters bis zur Brüstung des über dem Brandraum liegenden Fensters festgestellt.

Die Verformungen der Stahlbetonaußenstützen zeigten einen deutlichen zeitlichen Nachlauf gegenüber den Umgebungstemperaturen des Brandes (Bild 8-26). Während die maximalen Umgebungstemperaturen zwischen der 20. und 23. Minute auftraten, stellten sich die maximalen Verformungen zwischen der 35. und 38. Minute ein.

Wie aus Bild 8-27 ersichtlich ist, folgt die Verformung zeitlich etwa dem Anstieg der Temperatur der Meßstelle, die 3 cm tief im Querschnittsinneren lag. Die Verformungen der unbelasteten Stahlbetonstützen gingen nach dem Erkalten nicht ganz zurück. Bei allen Stahlbetonaußenstützen war die im Kaltzustand bleibende Verlängerung etwa 80 % des Maximalwertes, der während der Feuerbeanspruchung aufgetreten ist. Die Verkrümmung ging nach dem Erkalten auf etwa 40 % ihres Maximalwertes zurück.

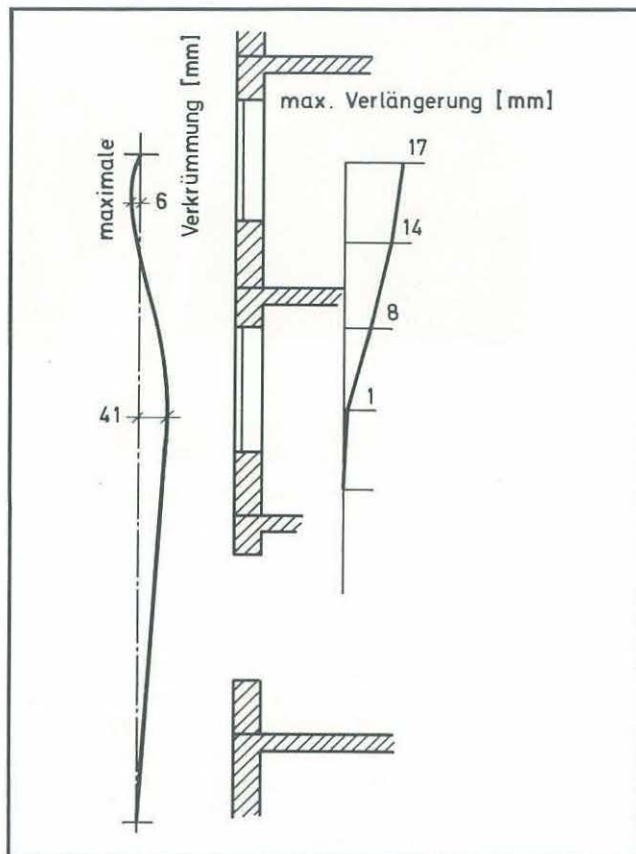


Bild 8-28: Maximale Verformungen der Außenstütze (Versuch 5)

Das Verformungsverhalten der IPB 240-Außenstützen hingegen war anders. Die Verformungen liefen nahezu simultan zur Erwärmung des Stahles ab (Bild 8-29). Alle Verformungen gingen nach dem Erkalten der Stützen auf Null zurück. Die Achse des Heißgasstromes lag im Falle des Fensters von Raum 1 des Versuches 5 von der 4. Minute nach dem Zünden bis zur 26. Minute etwa 80 – 90 cm von der Ebene der Frontwand ab (Windeinfluß). Demzufolge heizte sich der dem Brandraum abgekehrte Flansch der Außenstütze IPB 240 in Höhe des über dem Brandraum liegenden Geschosses mehr auf als der dem Brandraum zugekehrte. Deshalb zeigt die Außenstütze in ihrem oberen Teil eine Krümmung zum Versuchshaus hin.

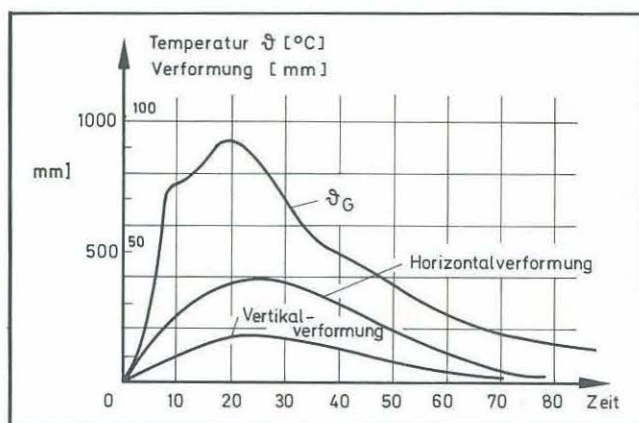


Bild 8-29: Zeit-Temperatur-Verlauf der Verformungen

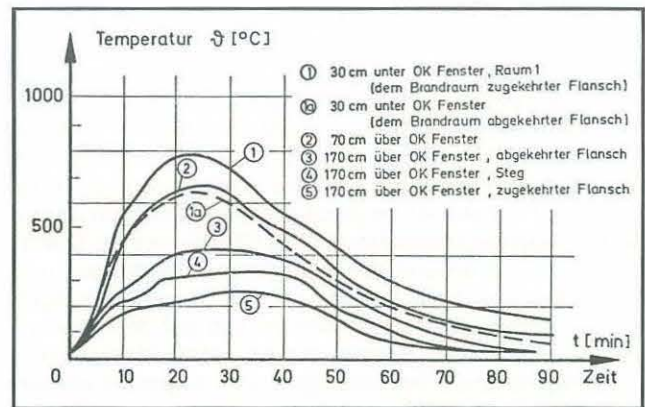


Bild 8-30: Zeit-Temperatur-Verlauf der Stahltemperatur der IPB 240-Außenstütze

8.5. Untersuchungen an den Balkonplatten aus Stahlbeton und an den Brüstungen aus einer Aluminiumlegierung

Im fensternahen Bereich erfuhren die Unterseiten aller beflamten Balkonplatten je nach Windeinfluß etwa 80 – 100 % der Brandbeanspruchung, die auf die Decke des zugehörigen Brandraumes einwirkte. Dieser Bereich dehnte sich – auch im Falle von Wind, der mit Geschwindigkeiten bis zu 3 m/s rechtwinklig auf die Frontwand zuwehte – mindestens bis zur Mitte der Balkonplatte aus. Bild 8-4 zeigt diesen Fall (linke Bildhälfte, oberer beflamter Balkon). Ohne Windeinfluß oder mit ungünstig wirkendem Wind (Bild 8-24) reichte der Bereich hoher Feuerbeanspruchung bis zum Rand der Balkonplatten (Bild 8-4, linke Bildhälfte, unterer beflamter Balkon; Bild 8-25, Bild 8-32). Der rußfreie Teil der Balkonplatten zeigte bis weit in die Abkühlphase des Brandes hinein Oberflächentemperaturen > 500 °C, so daß dort anfallender Ruß sofort verbrannte und sich nicht niederschlagen konnte.

Die brandbedingten Schädigungen des Betons – z. B. Zermürbungen und Abfall der Druckfestigkeit – waren innerhalb dieser Zone hoher Brandbeanspruchung gleichgroß wie an Stellen der Brandraumdecke, an der der Putz kurz nach Brandbeginn abgefallen war.

Die senkrechte Fläche des Plattenrandes zeigte bei den Versuchen ohne Windeinwirkung maximale Oberflächentemperaturen um oder wenig über 500 °C. Bei Versuchen mit günstig wirkendem Windeinfluß lagen die Oberflächentemperaturen des Plattenrandes um oder unter 350 °C.

Bei den Versuchen ohne Balkonbrüstungselemente und ohne zusätzliche Brandlast auf der Oberseite der beflamten Balkonplatte zeigte nur ein etwa 30 – 50 cm breiter Streifen längs des Plattenrandes eine nennenswerte Temperaturerhöhung ($\vartheta \sim 200$ °C). Der brandraumseitige Teil der Balkonplattenoberseite erwärmte sich kaum. Die Balkonplatten konnten – abgesehen vom heißen äußeren Randstreifen – unmittelbar nach den Brandversuchen begangen werden. Die Keramikplatten, mit denen die Balkone belegt waren, hatten sich teilweise vom Mörtelbett abgelöst, zeigten aber keine durch Brandeinwirkung entstandenen Schäden.

Der Abbrand von auf dem Balkon lagernder Brandlast (Bild 6-41) rief jedoch erhebliche Schäden am Balkonplattenbelag hervor. Sämtliche Keramikplatten waren vom Mörtelbett abgelöst, mehr als die Hälfte war gesprungen.

Entsprechend dem Temperaturgeschehen und der Ausdehnung der Flammen über dem von unten und oben beflamten Balkon kann vermutet werden, daß die Balkonplattenoberseiten mit etwa gleicher Brandintensität, jedoch kürzerer Einwirkungszeit beflammt wurden als die Oberseite der Brandraumbodenplatten im Falle einer Belegung des Brandraumes mit der gleichen Brandbelastung (hier 15 kg Holz/m²). Ein genauer Vergleich der Brandeinwirkungen auf die Balkonplattenoberseiten und die Oberflächen der Brandraumböden ist anhand der vorliegenden Messungen und Beobachtungen nicht möglich, da die Feuereinwirkungen auf die Keramikplatten der Balkone und auf den schwimmenden Estrich der Brandräume so unterschiedlich sind, daß vergleichende Betrachtungen nicht angestellt werden können.

Die Brüstungen schirmten – sofern sie nicht teilweise abgeschmolzen waren – die Oberseite der Balkonplatten vor Feuereinwirkungen ab (s. hierzu auch Bild 8–31).

Solange die Brüstungselemente weder verbogen noch geschmolzen waren, wurden im Bereich der Balkonplattenoberseiten keine erhöhten Temperaturen festgestellt.

Sobald sich jedoch die ersten Beschädigungen an den Brüstungselementen einstellten, die Heißgase in den Balkonbereich durchtreten ließen (z. B. bei Versuch 2 bereits 11 Minuten nach dem Zünden der Brandlast in Raum 2 der Wohnung 9), konnten örtlich mit dem Wanderthermoelement Temperaturen festgestellt werden, die etwa den der vor der Brüstung herrschenden Heißgastemperaturen entsprachen.

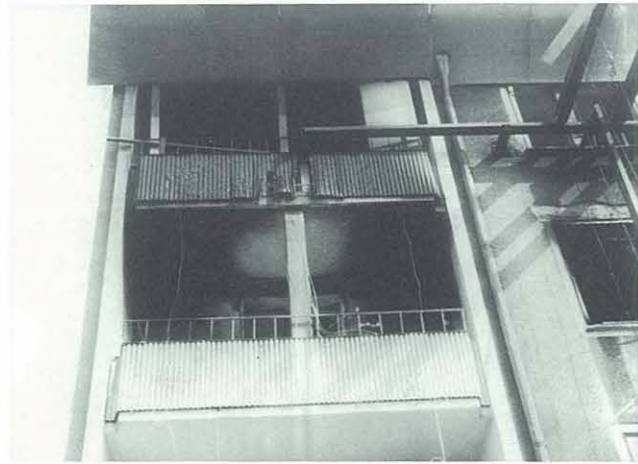


Bild 8–31: Brandbeanspruchte Balkonplatte und teilweise abgeschmolzene Balkonbrüstung

Die Balkonbrüstungen waren aus einer Aluminiumlegierung mit einem Schmelzpunkt von ca. 650 – 680 °C hergestellt. Entsprechend ihrer geringen Dicke ($d = 4 \text{ mm}$) erwärmten sich die profilierten Brüstungsplatten sehr schnell (Bild 8–32) und erreichten im Bereich der Balkonmitte die Schmelztemperatur. Teile der Brüstungen tropften dort ab (Bild 8–31) und fielen auf den Balkon in Höhe des Brandgeschosses oder auf den Erdboden.

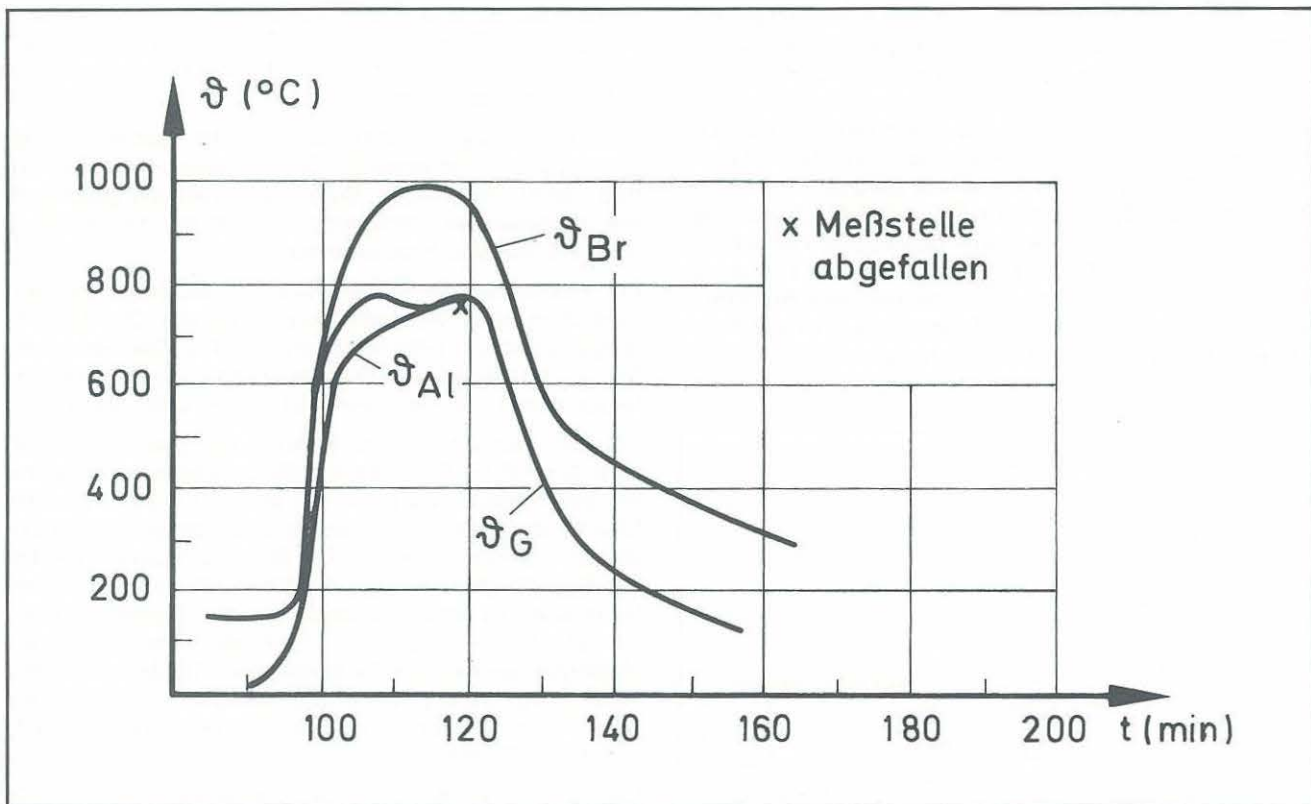


Bild 8–32: Temperaturverlauf im Brandraum ϑ_{Br} , im Heißgasstrom vor dem Balkon ϑ_G und am Brüstungselement aus Aluminium ϑ_{Al} (Versuch 2)

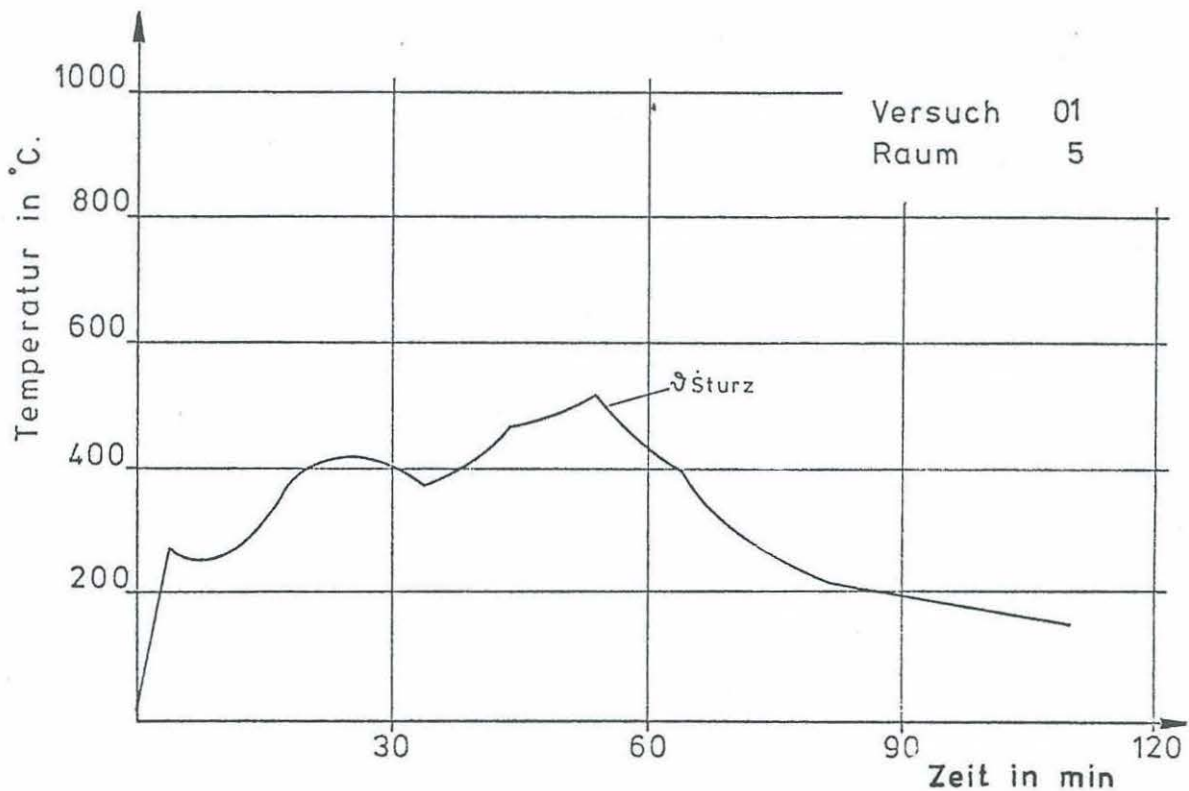
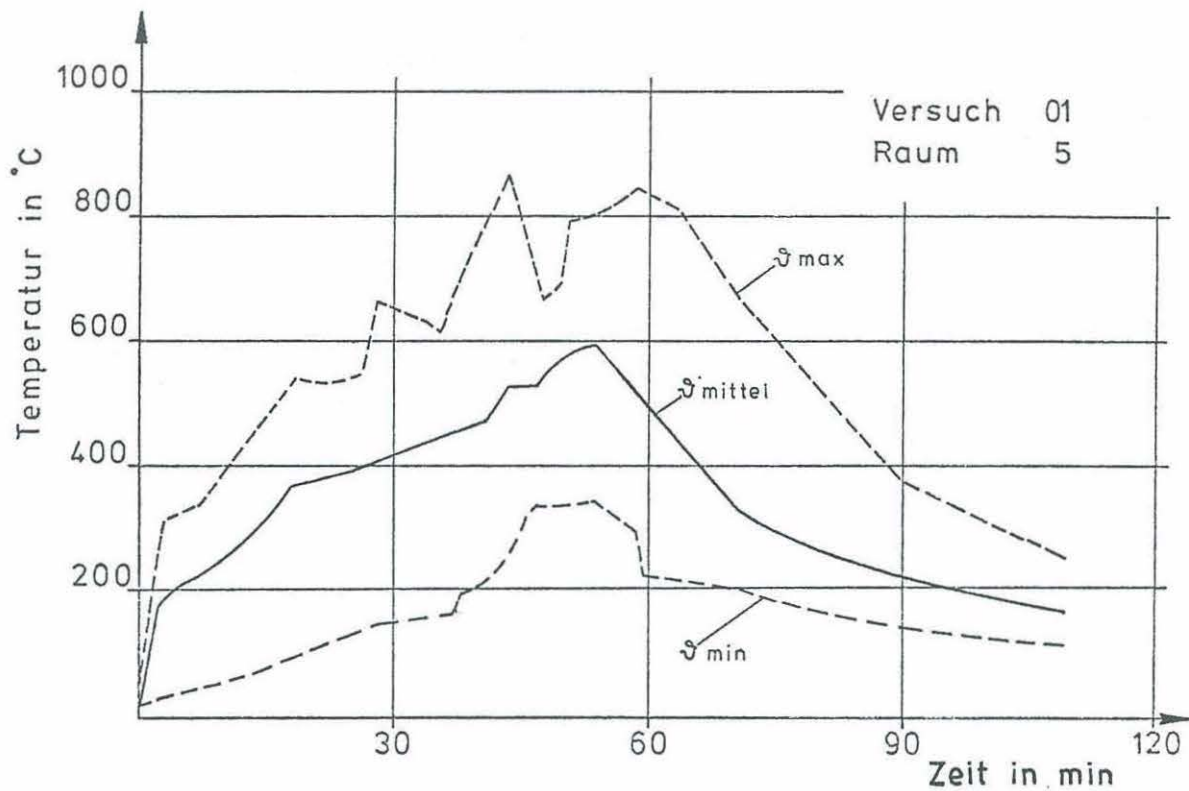
- [1] Ehm, H.:
Neue Wege der Brandforschung: Natürliche Brände und Möglichkeiten ihrer Umrechnung.
VFDB-Zeitschrift 19 (1970), H. 2, S. 55–61.
- [2] Wierig, H. J.:
Über das Verhalten von Massivbauten im Brand.
VFDB-Zeitschrift 22 (1973), H. 2, S. 58–62.
- [3] Knublauch, E.:
Über die Ausführung und die Aussagefähigkeit des Normbrandversuchs nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer.
BAM-Berichte August (1972), Nr. 16.
- [4] Arnault, P., H. Ehm, J. Kruppa:
Rapport Experimental sur les essais avec des feux naturels executes dans la petite installation.
Convention Europeene de la construction metallique, DOC C.E.C.M. – 3173 – 11 – F.
- [5] Ehm, H. und P. Arnault:
Versuchsbericht über die Untersuchungen mit natürlichen Bränden im kleinen Versuchshaus.
Europäische Konvention der Stahlbauverbände, DOC C.E.A.C.M. 3.1 – 62/29 – D, F.
- [6] Butcher, E.G., Chitty, T. B., und Ashton, L. A.:
The temperature attained by steel in building fires.
Fire Research Technical Paper No. 15. Her Majesty's Stationary Office, London, 1966.
- [7] Gripas, S., Y. Povzik:
Experimental fires in dwellings.
Pozharnee Delo (1970), Nr. 1, S. 23–25.
- [8] Pryor, A. J.:
Full-scale fire test of interior wall finish assemblies.
Fire Journal 63 (1969) 2, S. 14–20.
- [9] Baldwin, R., P. H. Thomas:
Spread of fire in Buildings – Effect of the source of ignition.
Sonderdruck aus Institution of Fire Engineers Quarterly.
- [10] Schütze, W.:
Versuche in natürlichem Maßstab zur Untersuchung der baulichen Bedingungen für die Ausbreitung von Bränden.
VFDB-Zeitschrift 11 (1962), H. 3.
- [11] Rogowski, B. F. W.:
The fire propagation test: its development and application.
Fire Research Technical Paper (1970), Nr. 25.
- [12] Magnusson, S.E., S. Thelandersson:
Comments on rate of gas flow and rate of burning for fires in enclosures.
Bulletin of Lund Institute of Technology (1971), Nr. 19.
- [13] Christian, W. J., T. E. Watermann:
Characteristics of full-scale fires in various occupancy.
Fire Technology 7 (1971) 3, S. 205–217.
- [14] Tsuchiya, Y., K. Sumi:
Computation of the behaviour of fire in an enclosure.
Combustion and flame 16 (1971), Nr. 2, S. 131–139.
- [15] Spohn, H. D., H. Weck:
Brandversuch in Gelsenkirchen am 11. 1. 1971.
Brandschutz 25 (1971), H. 6, S. 184–186.
- [16] Thomas, P. H., A. J. M. Heselden:
Fully-developed fires in single compartments.
Fire Research Note (1972), Nr. 923, S. 1–30.
- [17] Kóvács, K., M. Siklósi:
Safety fire-tests of wooden houses.
Bericht der EMI (Ungarn), (1971).
- [18] Christian, W. J., T. E. Waterman:
Flame spread in corridors: Effects of location and area of wall finish.
Fire Journal 65 (1971), Nr. 4, S. 25–32.
- [19] Seeger, P.G., R. John:
Brand- und Lüftungsversuche in einem Wohnhochhaus mit innenliegendem Treppenraum.
VFDB-Zeitschrift 21 (1972), H. 4, S. 125–132.
- [20] Rodger, H.:
Brandversuche an einem Wohnhochhaus mit Innentreppe.
Brandschutz 26 (1972), H. 8, S. 259–262.
- [21] –
Wie sich ein Brand ausbreitet (orig. spanisch).
(Como se propaga un incendio).
Aself (1966) 8, S. 180–181.
- [22] Czech, R.:
Ermittlung von Brandlasten in Bürogebäuden.
Europäische Konvention für Stahlbau, Unterkommision 3.1
(Unveröffentlicht).
- [23] Nilsson, L.:
Fire loads in flats.
Division of Structural Mechanics and Concrete.
Construction Bulletin 15 (1970), Bericht Nr. R 34/1970.
- [24] Smith, P. G., P. H. Thomas:
The rate of burning of wood cribs.
Fire Technology 6 (1970) 1, S. 529–538.
- [25] Heselden, A. J. M., P. H. Thomas, M. Law:
Burning rate of ventilation controlled fires in compartments.
Fire Technology 6 (1970), Nr. 2, S. 123–125.

- [26] Knublauch, E.:
Brandbelastung. Abbrandgeschwindigkeit, Energiefreisetzung und Brandgeschehen.
Fortschrittsberichte der VDI-Zeitschriften (1970), Reihe 5, Nr. 10, S. 40.
- [27] Moulen, A.W.:
Horizontal projections in the prevention of spread of fire from storey to storey.
Technical Report of the Departments of Works.
Commonwealth Experimental Building Station, Febr. (1971), Nr. 52/75/397.
- [28] DIN 4102 – Baulicher Brandschutz, Ausgabe 1970.
- [29] Cox, G.:
Gas velocity measurement in fires by the crosscorrelation of random thermal fluctuations. Fire Note No. 1032.
Joint Fire Research Organisation Boreham Wood/England, 1975.
- [30] Bechtold, R.:
Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall.
Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1977.
- [31] Gumsz, W.:
Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik.
Springer-Verlag.
- [32] Seigel, L.C.:
Fire Test of an Exterior Steel Sprocket Girder.
Materials Research and Standards 10 (1970) Nr. 2, S. 10–13.
- [33] DIN 1055 Lastannahmen Blatt 4.
- [34] VDI-Wärmeatlas; VDI-Verlag GmbH, 2. Auflage, Düsseldorf, 1974.
- [35] Schwanecke, R.:
Sicherheitstechnik und Nachbarschutz an Abgasfakeln.
Verfahrenstechnik 8, Nr. 6, 1974.
- [36] Den Braven, K.:
Radiative Ignition of Some Typical Floor covering Materials, Bericht NBSIR 75 – 967 des National Bureau of Standards,
U.S. Department of Commerce (Dezember 1975).
- [37] Pandaya:
Untersuchung über die Strahlung von Gaskörpern ungleicher Temperatur.
Dissertation TH Aachen, 1961.
- [38] Schneider, U., Haksever, A.:
Bestimmung der äquivalenten Branddauer von statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonbalken bei natürlichen Bränden.
Forschungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig (unveröffentlicht).
- [39] Kordina, K., Wesche, J.
Stahlbetondurchlaufkonstruktionen unter Feuerangriff bei Variierung von Stahlart und -güte der Biegezugbewegung im Stützbereich.
- [40] Kordina, K., Bornemann, P.:
Brandverhalten von Stahlbetonplatten.
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 181.
- [41] Krampf, L.:
Einfluß von elastischen Randeinspannungen auf das Tragverhalten von einachsig gespannten, durchlaufenden Platten unter Brandeinwirkung. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig (unveröffentlicht), 1970.
- [42] Ehm, H., von Postel, R.:
Versuche an Stahlbetonkonstruktionen mit Durchlaufwirkung unter Feuerangriff.
Feuerwiderstandsfähigkeit von Spannbeton.
Ergebnisse einer Tagung der FIP in Braunschweig, 1965.
Bauverlag GmbH, Wiesbaden – Berlin, 1966.
- [43] Ehm, H., Krampf, L., von Postel, R.:
Durchlaufende Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung.
Forschungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig (unveröffentlicht), 1970.
- [44] Wesche, J.:
Stahlbetondurchlaufkonstruktionen unter Feuerangriff.
Forschungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig (unveröffentlicht), 1974.
- [45] Brand eines Lagergebäudes 1960/1961 der Dätwyler AG, Altdorf, am 8./9. Mai 1963.
- [46] Krampf, L.:
Brand bei Linde, 1971.
VFDB-Zeitschrift 2/73.
- [47] Meyer-Ottens, C.:
Brandschutz, Untersuchung an Wänden, Decken und Dacheindeckungen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 70.

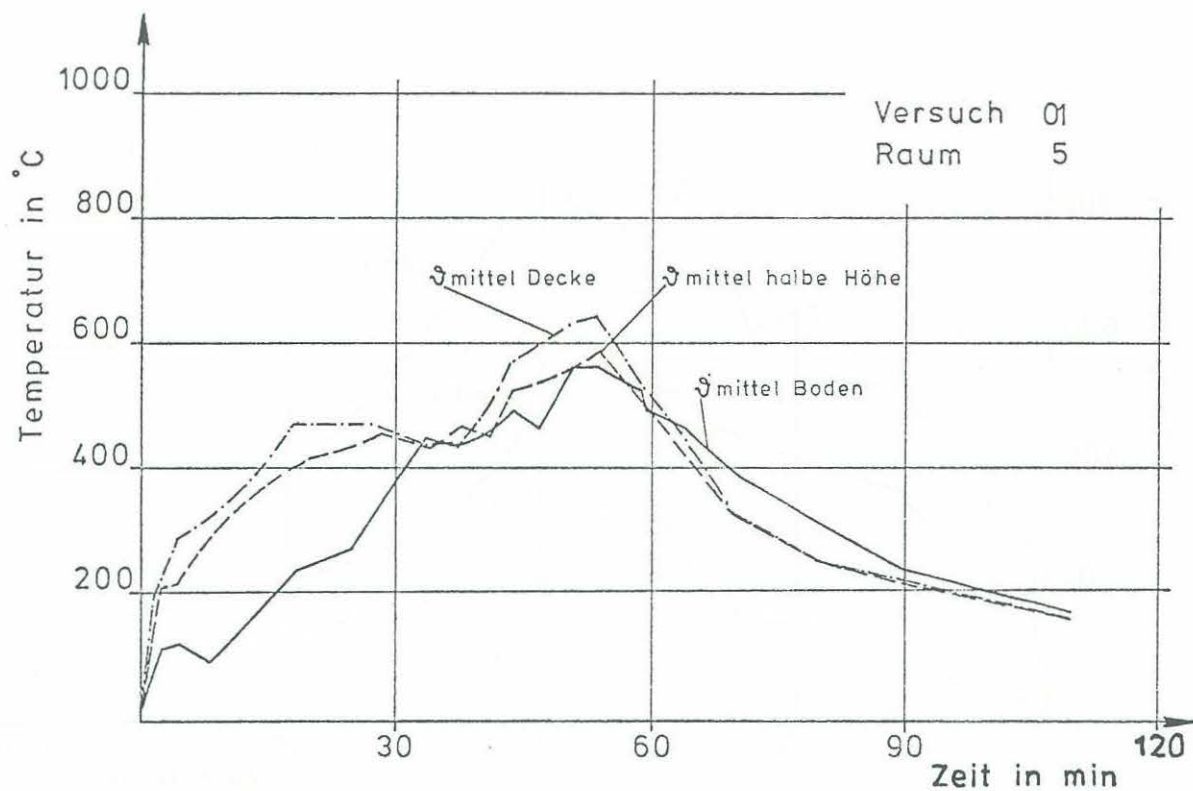
**Brandversuche Lehrte
Anlagen
zum
Forschungsbericht**

Die nachstehend wiedergegebenen Meßergebnisse sind in der Reihenfolge der Versuche geordnet. Der Übersicht wegen sind sie entsprechend den Kapiteln des Forschungsberichtes unterteilt. Innerhalb der einzelnen Teiluntersuchungen sind sie fortlaufend numeriert.

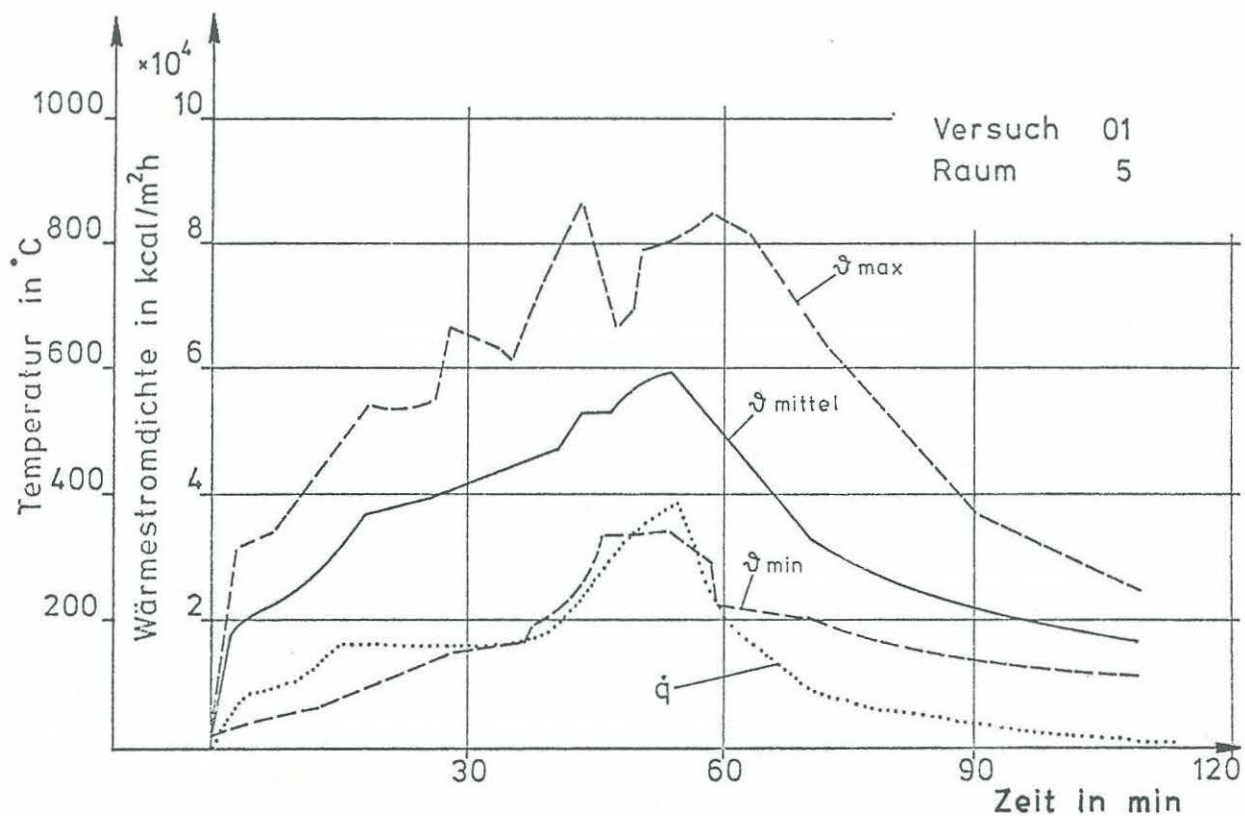
Die Untersuchungsergebnisse sind technisch und graphisch soweit aufbereitet, so daß sie zur Verwendung für weitere wissenschaftliche Arbeiten überschaubar sind. Bei den Temperaturmeßergebnissen sind jeweils die Durchschnitts- und die Extremwerte angegeben. Wie diese aus den Einzelmessdaten ermittelt wurden, ist im Forschungsbericht erläutert.



Anlage zum Versuch 01
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2

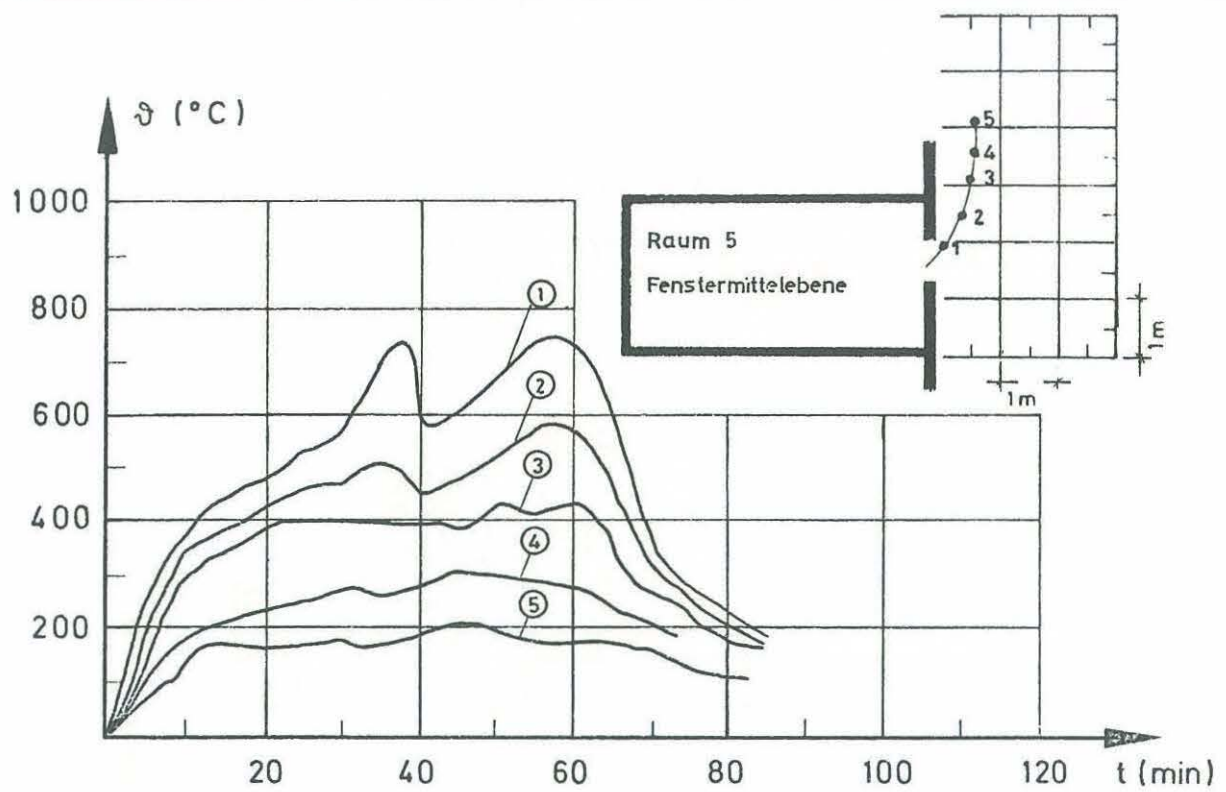


Temperaturschichtung gemessen in drei horizontalen Ebenen

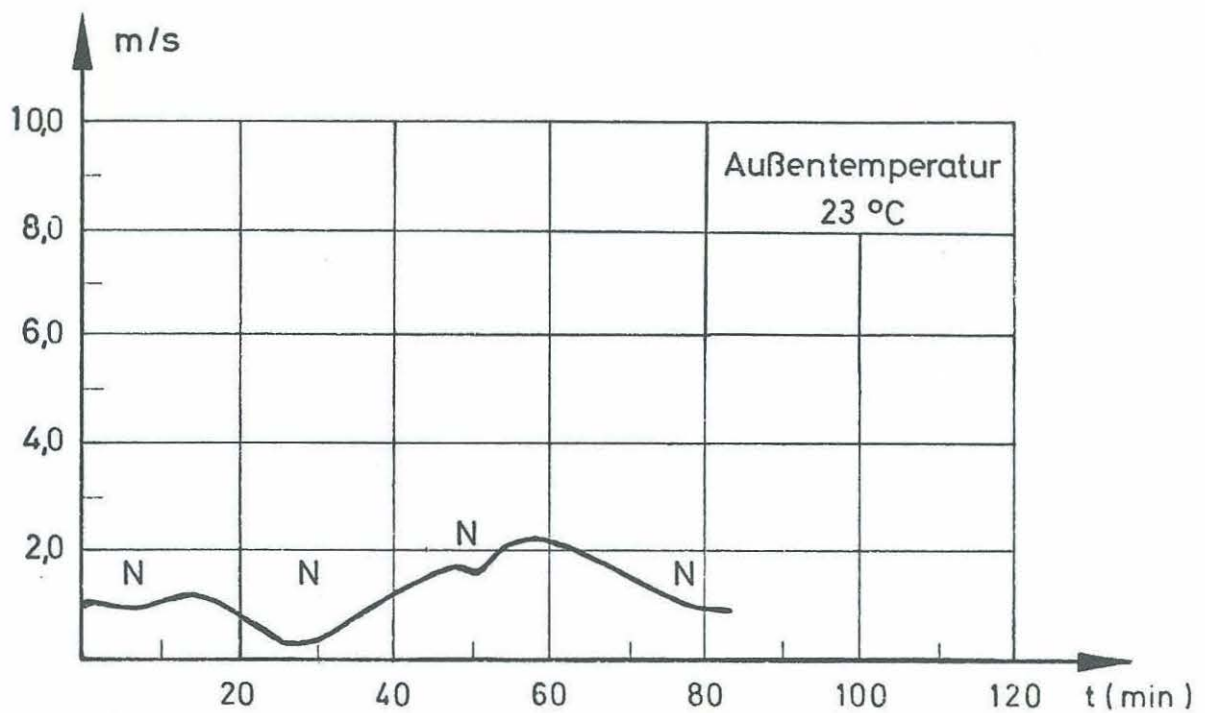


Temperaturstreibereich und Wärmestromdichte in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 01
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4

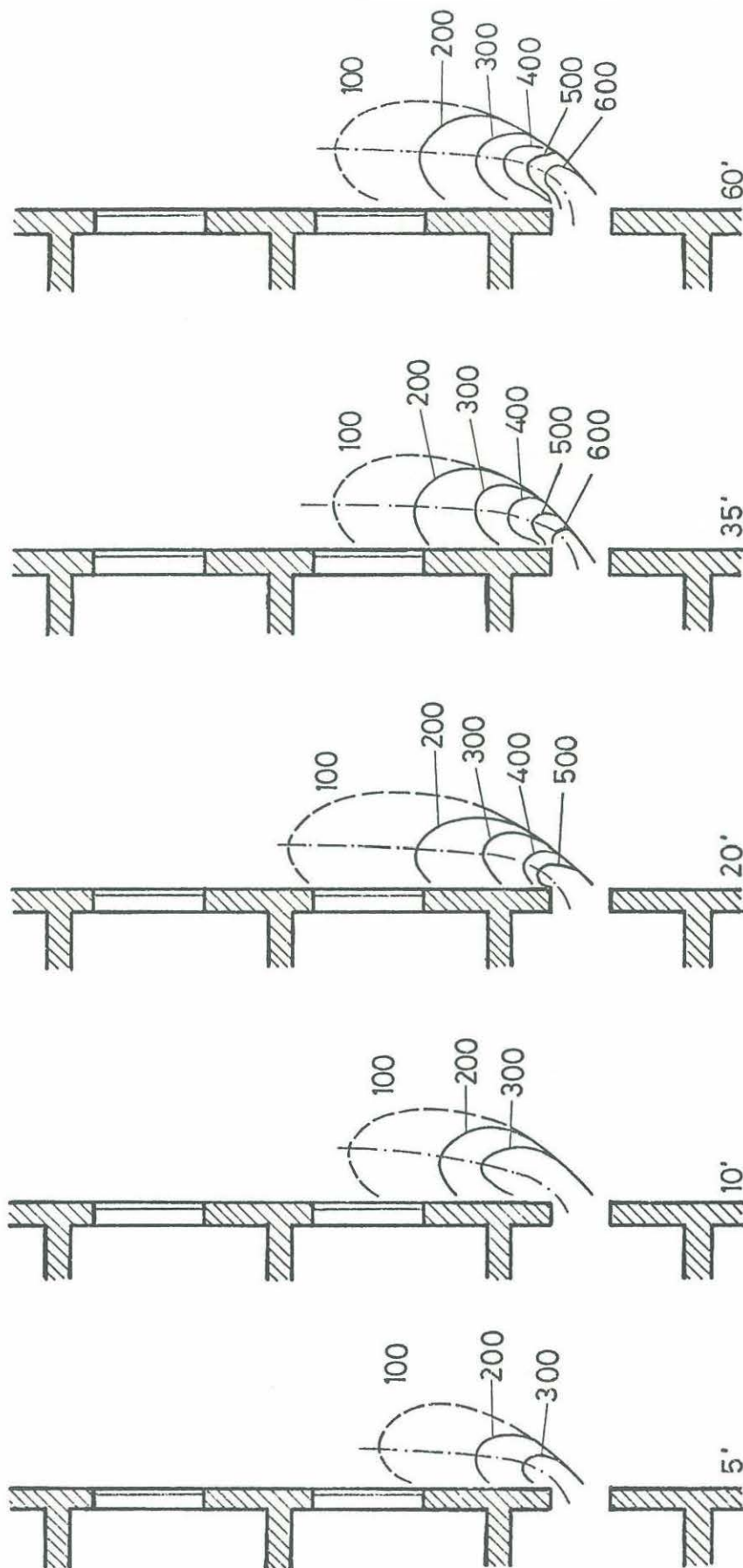


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Schnitt in Fenstermitte)



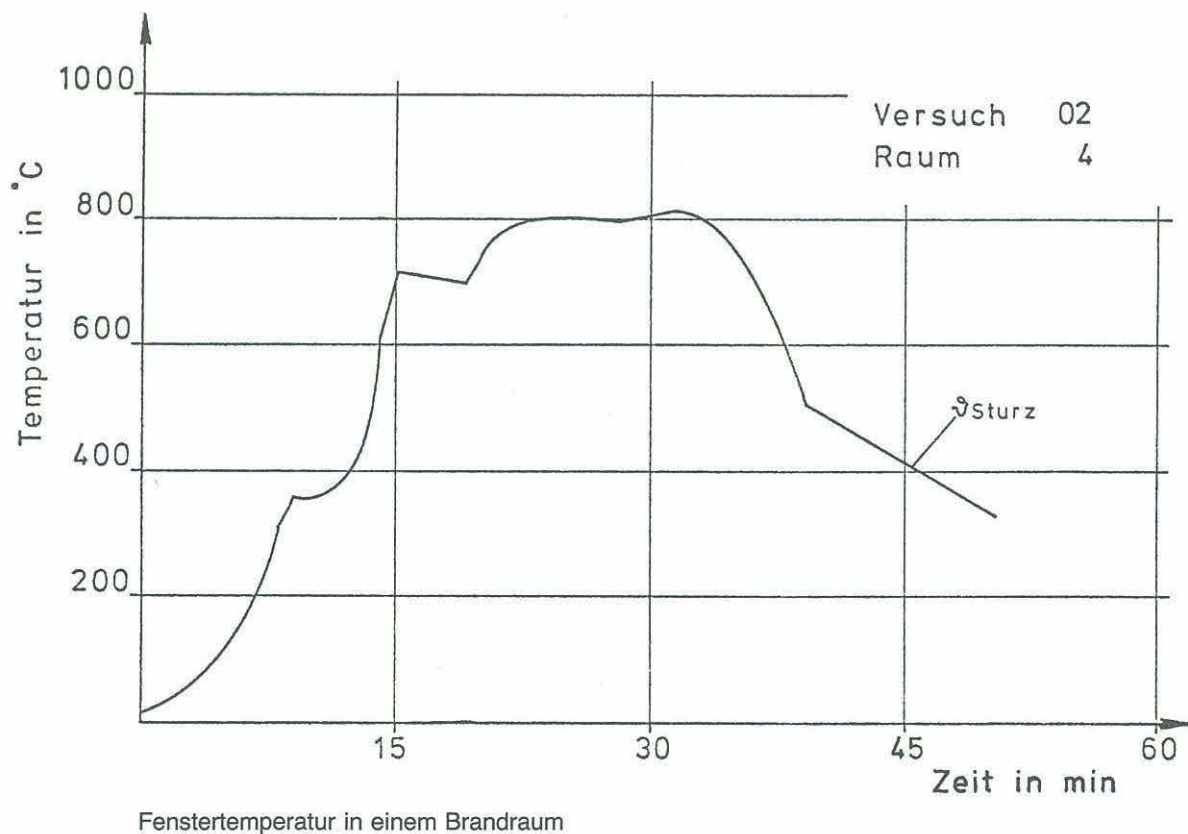
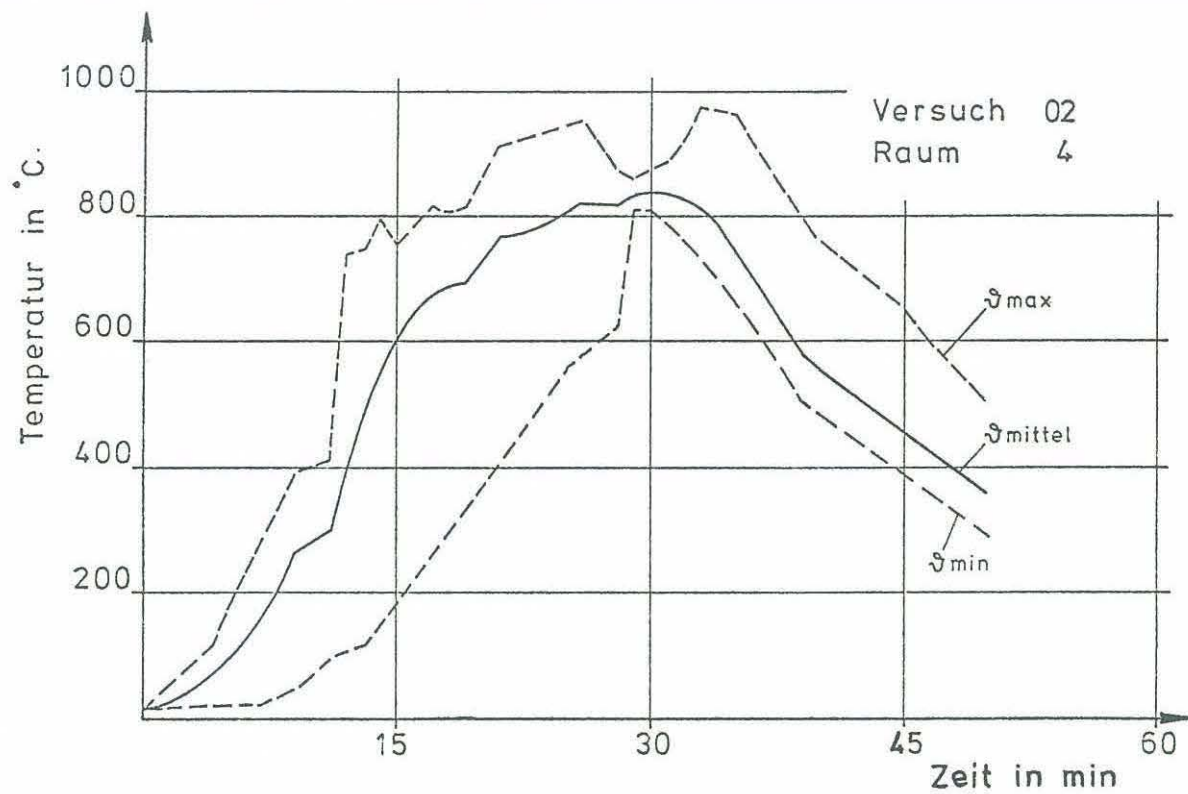
Windgeschwindigkeit und Richtung

Anlage zum Versuch 01
Kap. 6.2 Nr. 1

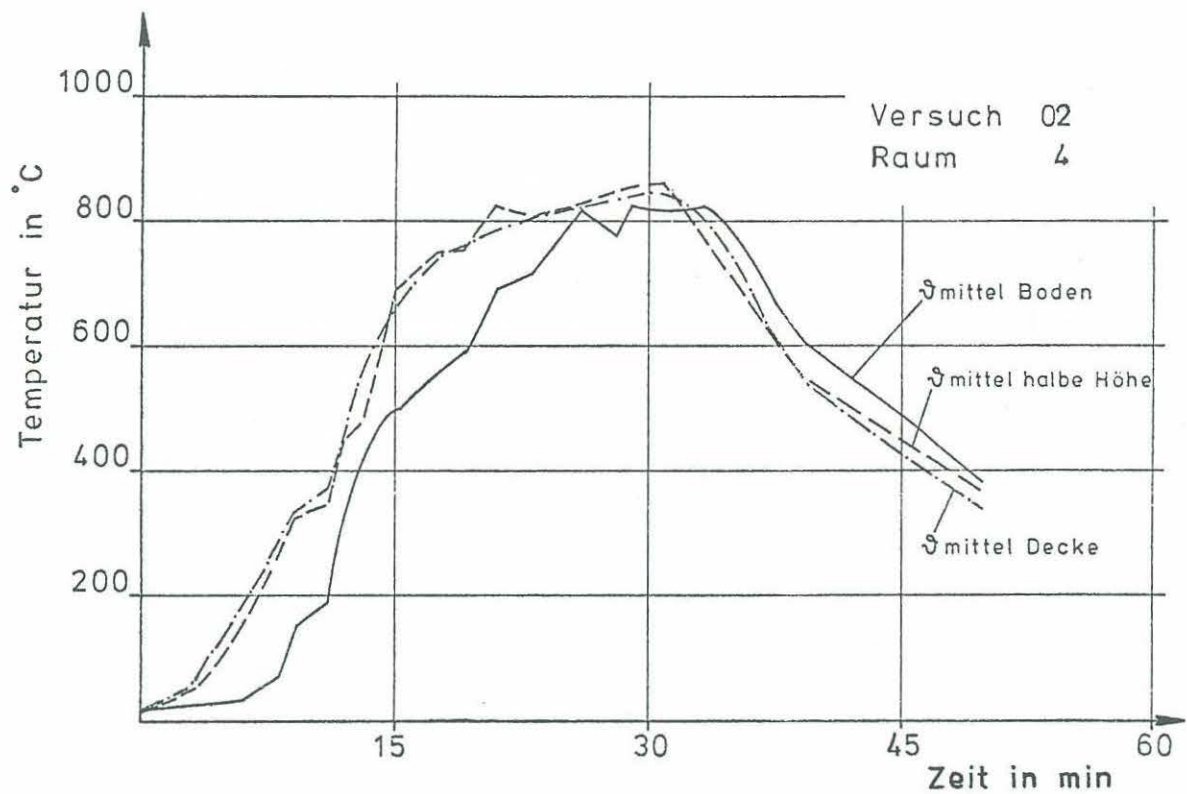


Isothermen des Temperaturverhaltens vor der Fassade (Fenstermittelebene)

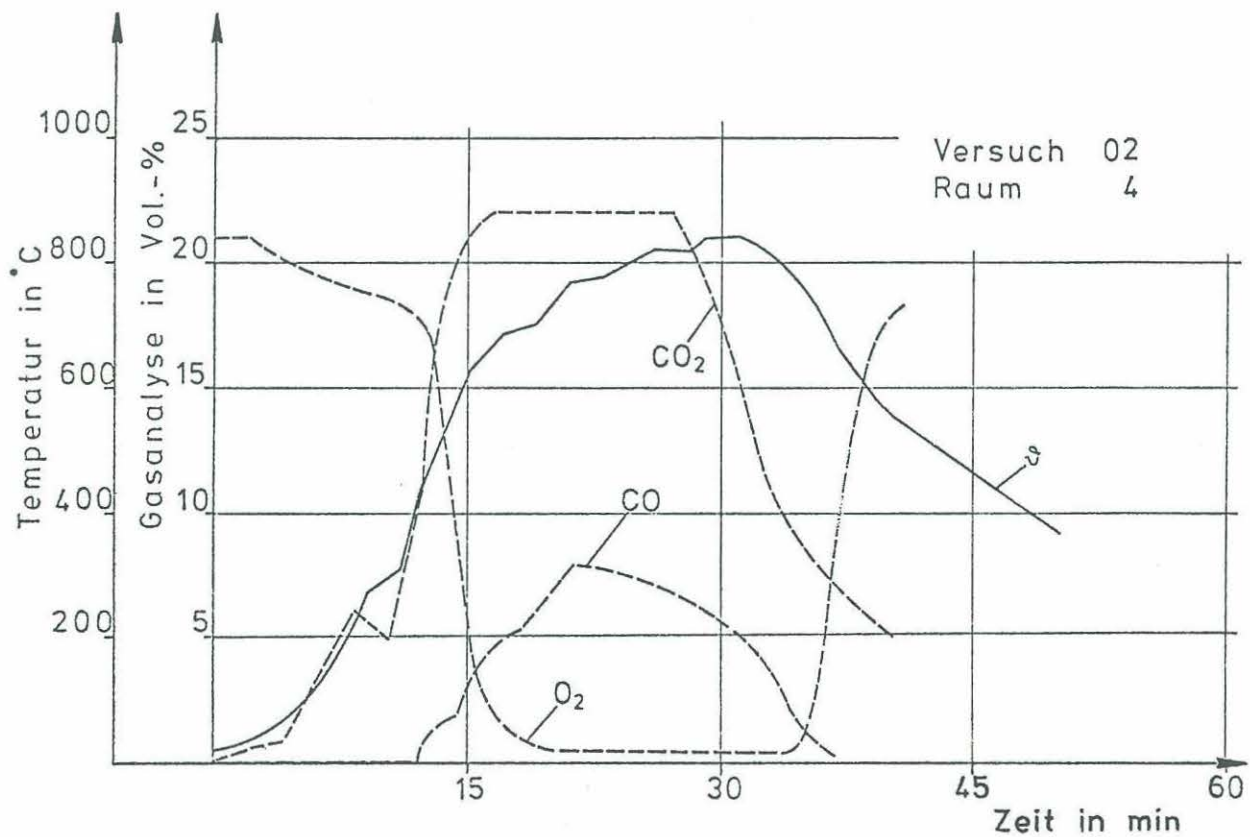
Anlage zum Versuch 01
Kap. 6.2 Nr. 2



Anlage zum Versuch 02
 Kap. 6.1 Nr. 1
 Kap. 6.1 Nr. 2

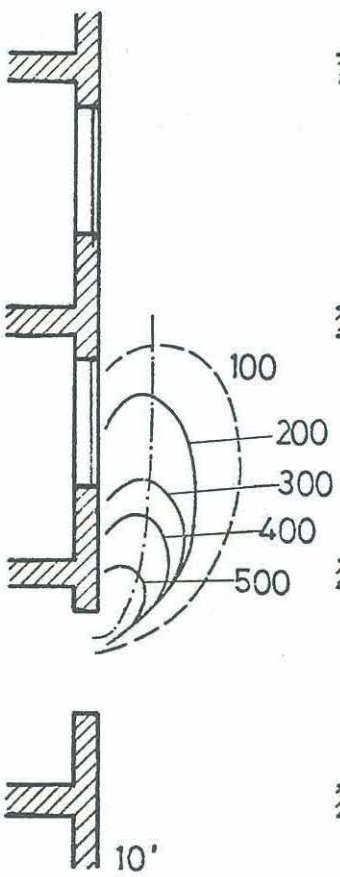
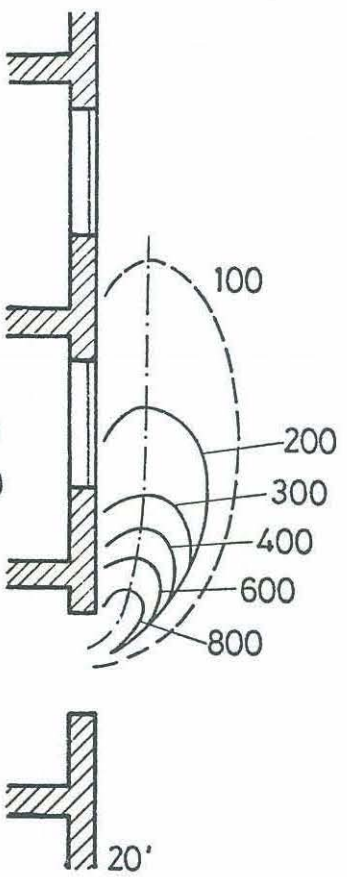
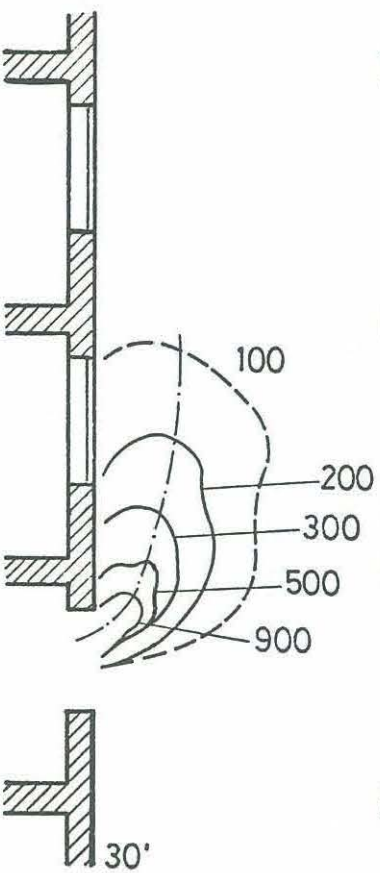
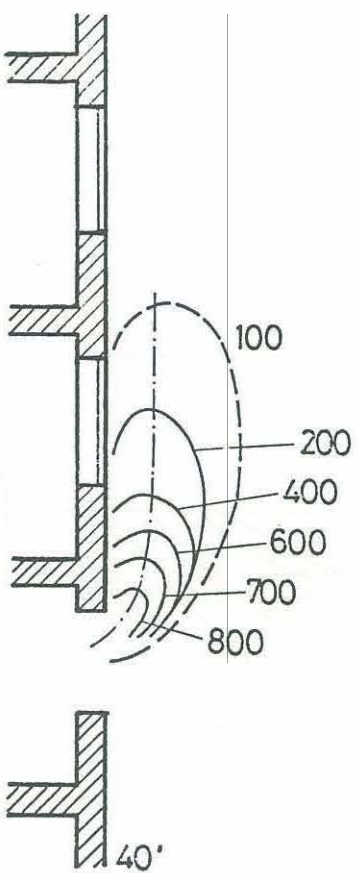
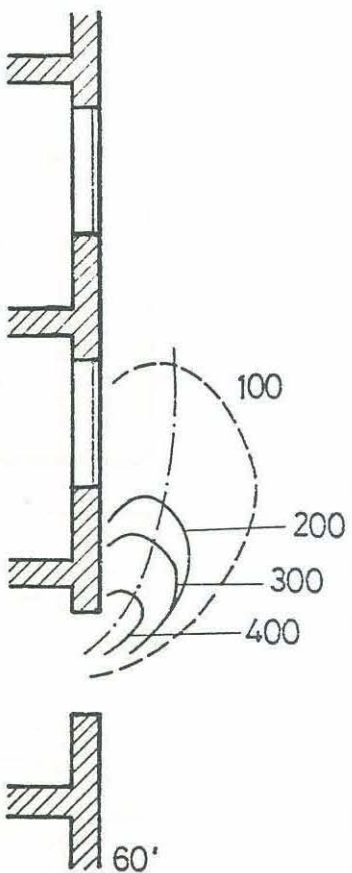


Temperaturschichtung gemessen in drei horizontalen Ebenen

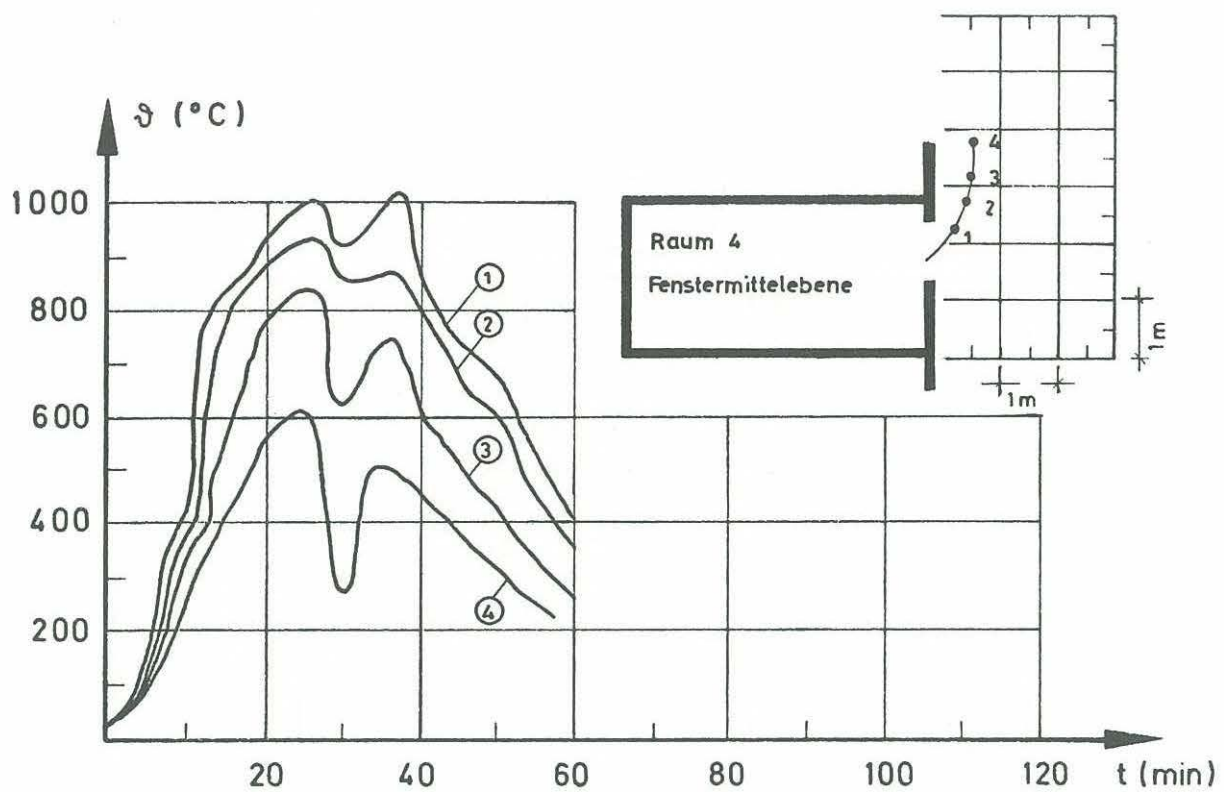


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

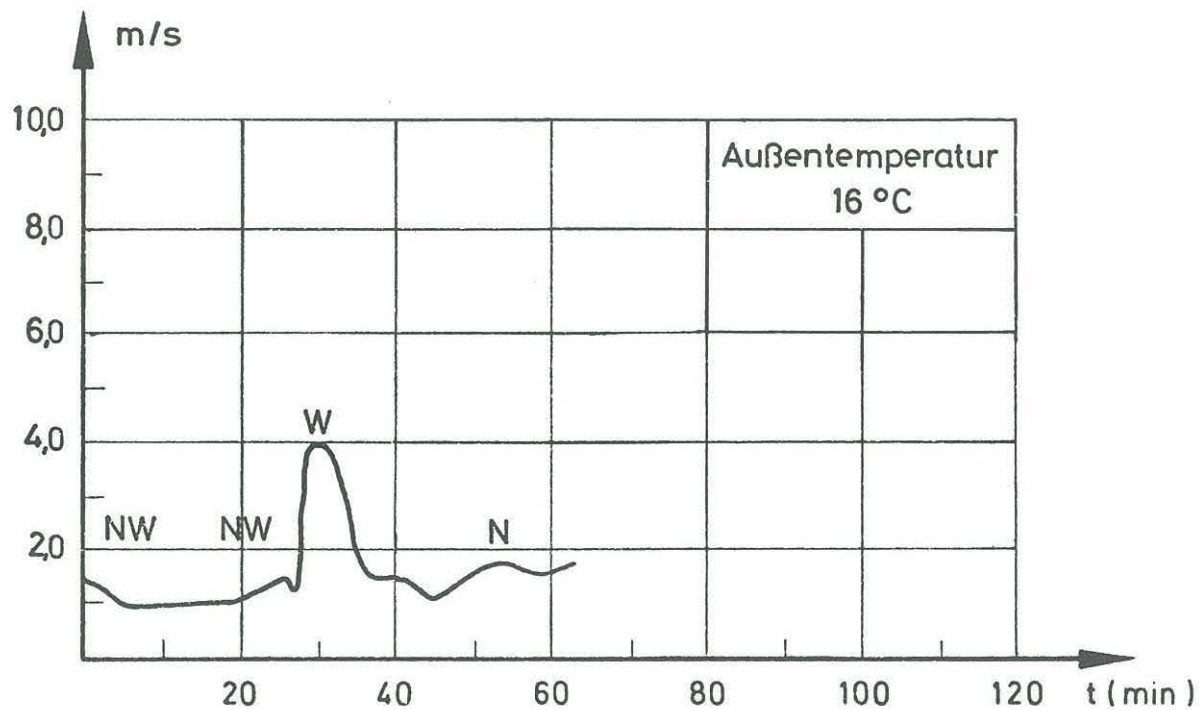
Anlage zum Versuch 02
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4



Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Fenstermittelebene)

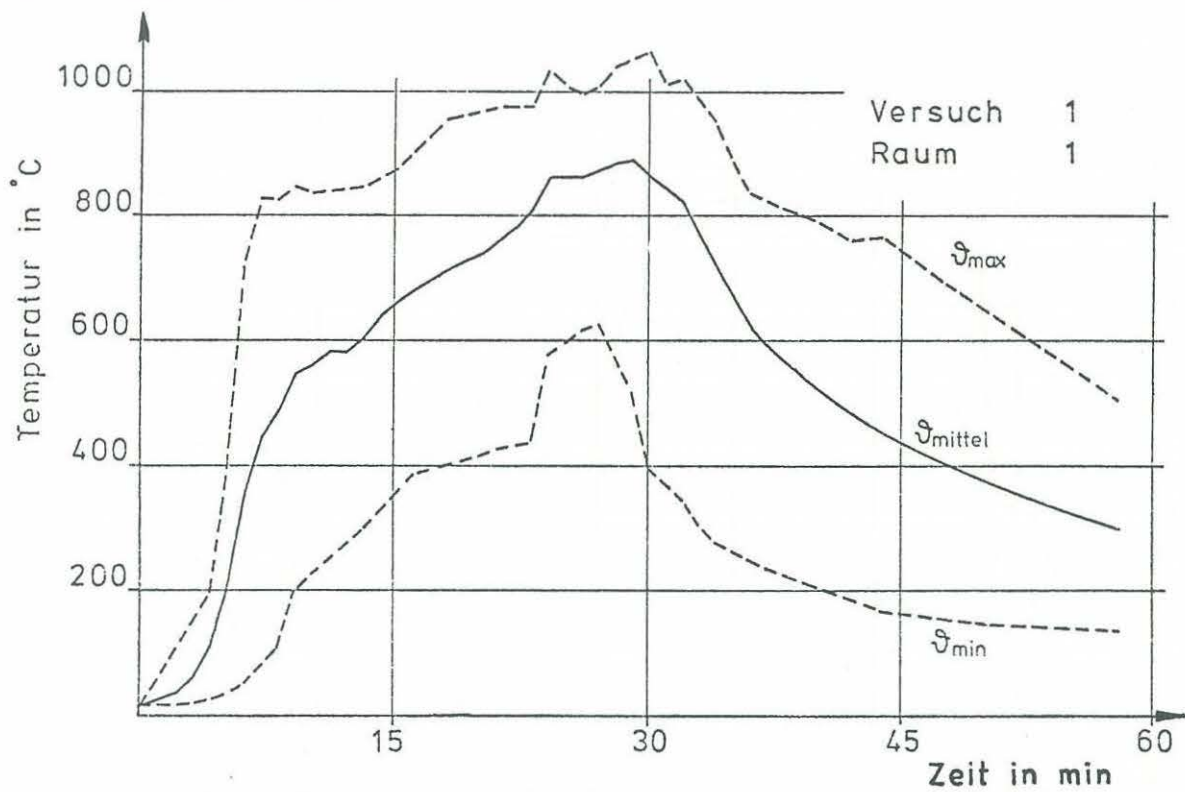


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Schnitt in Fenstermitte)

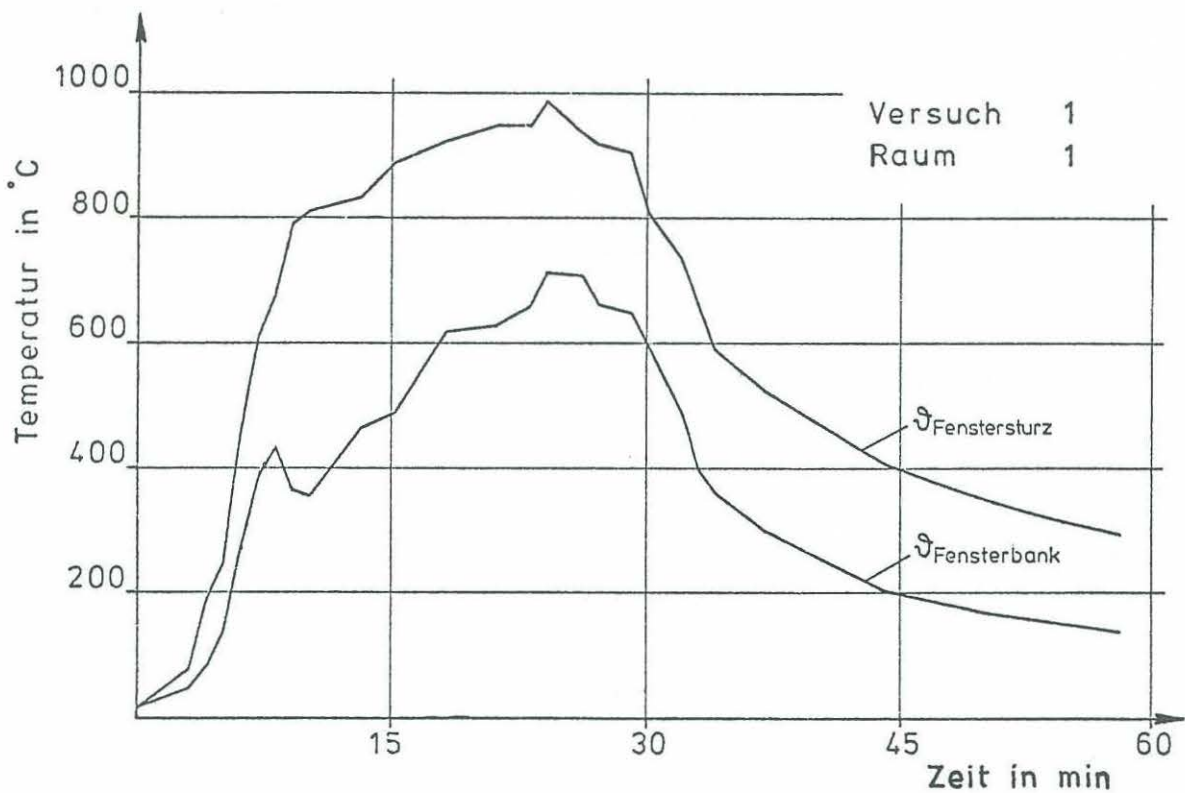


Windgeschwindigkeit und Richtung

Anlage zum Versuch 02
Kap. 6.2 Nr. 2

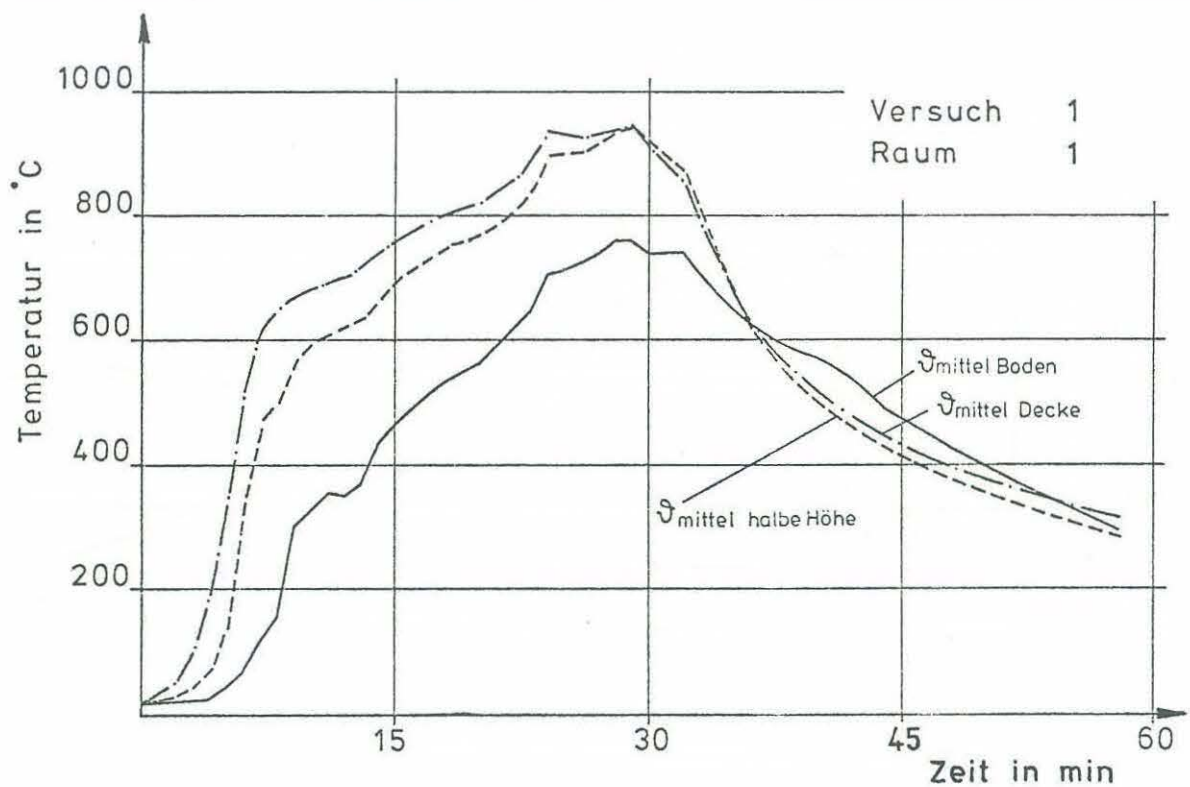


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

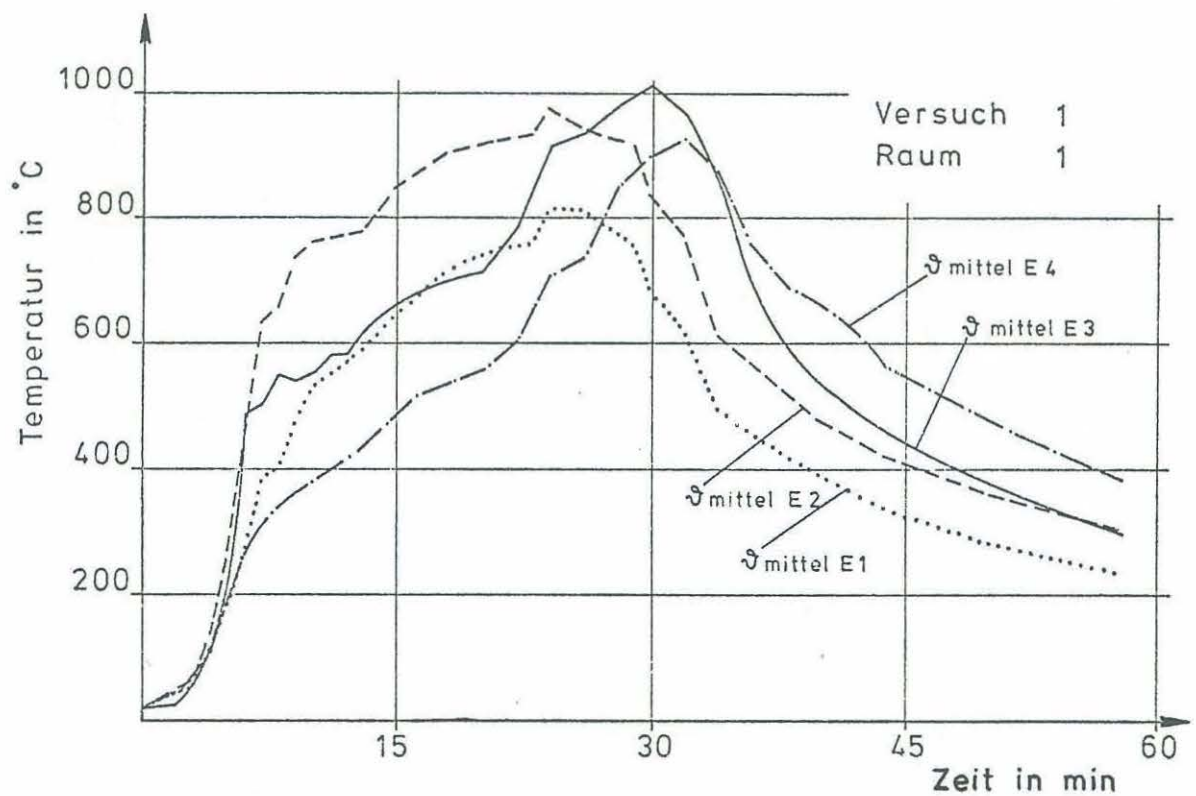


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 1
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2

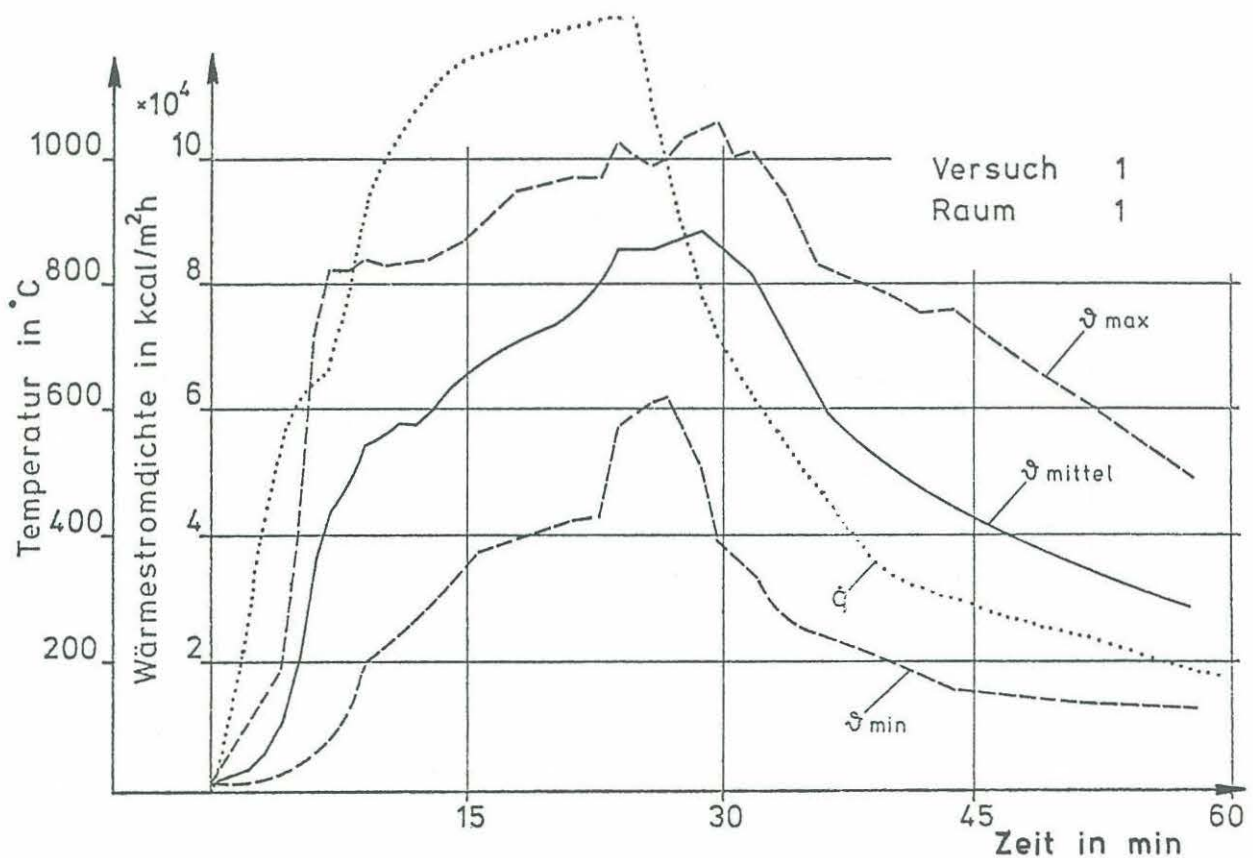
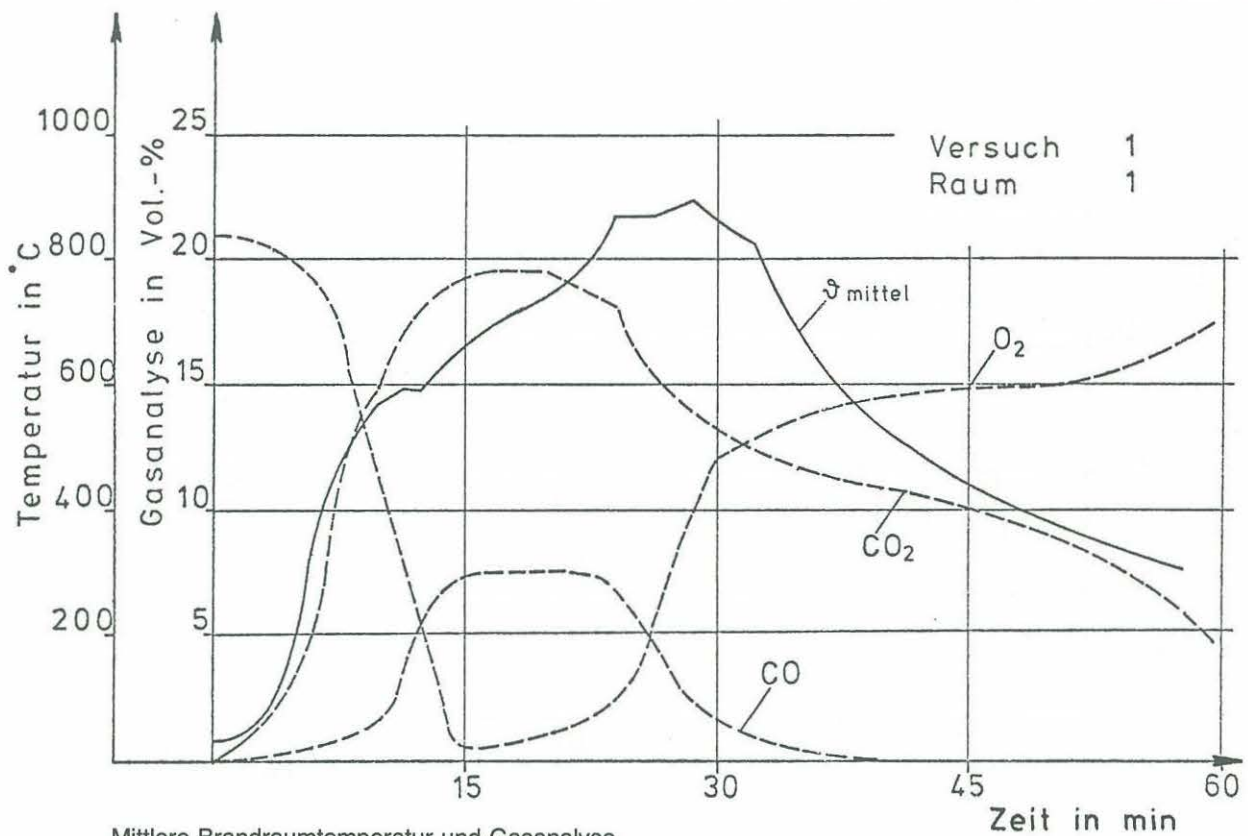


Temperaturschichtung gemessen in drei horizontalen Ebenen

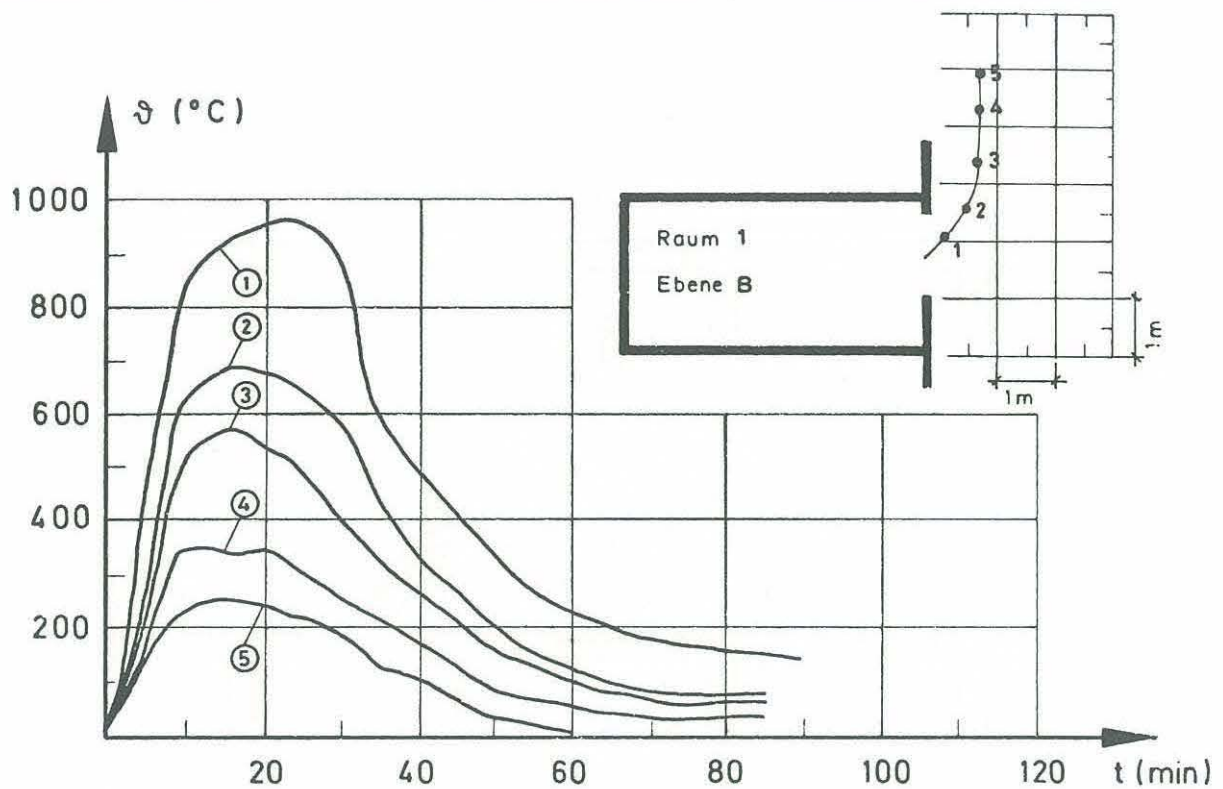


Temperaturschichtung gemessen in vier vertikalen Ebenen (vom Fenster aus mit E 1 beginnend)

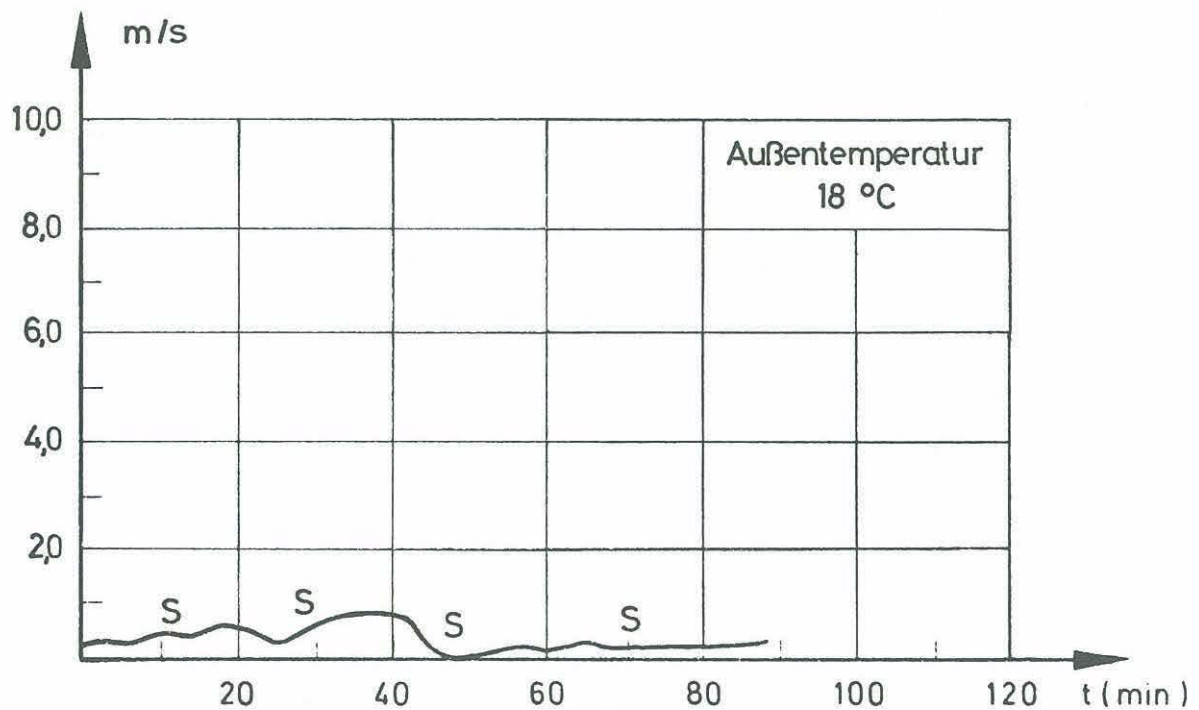
Anlage zum Versuch 1
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4



Anlage zum Versuch 1
Kap. 6.1 Nr. 5
Kap. 6.1 Nr. 6

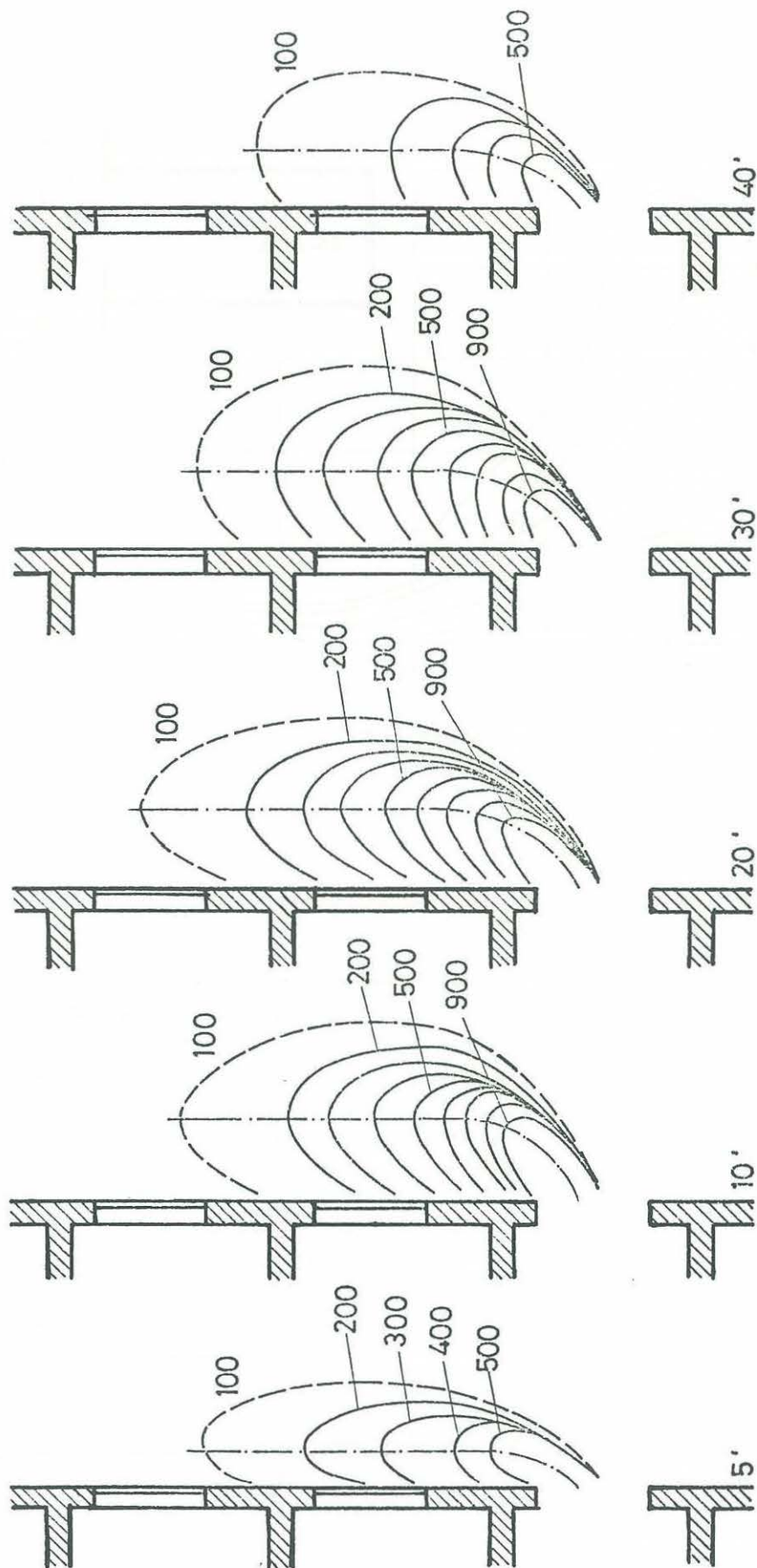


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene B)



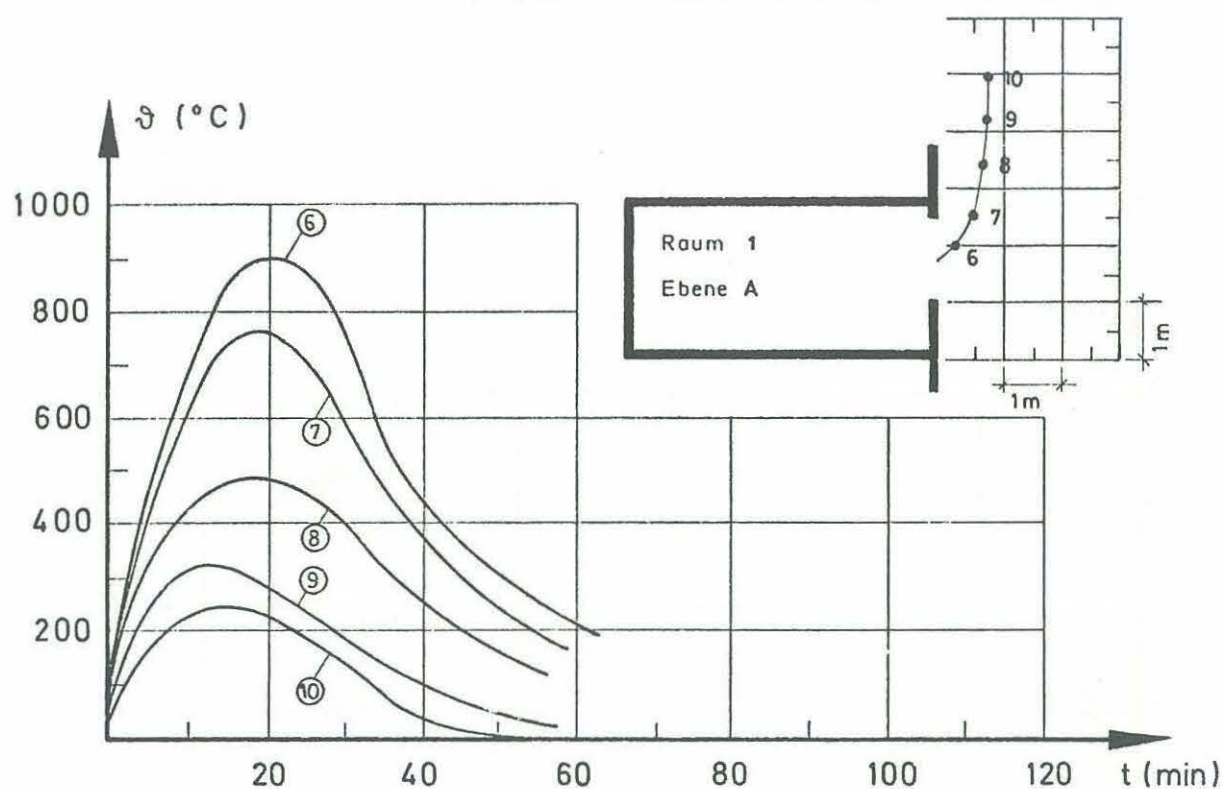
Windgeschwindigkeit und Richtung

Anlage zum Versuch 1
Kap. 6.2 Nr. 1

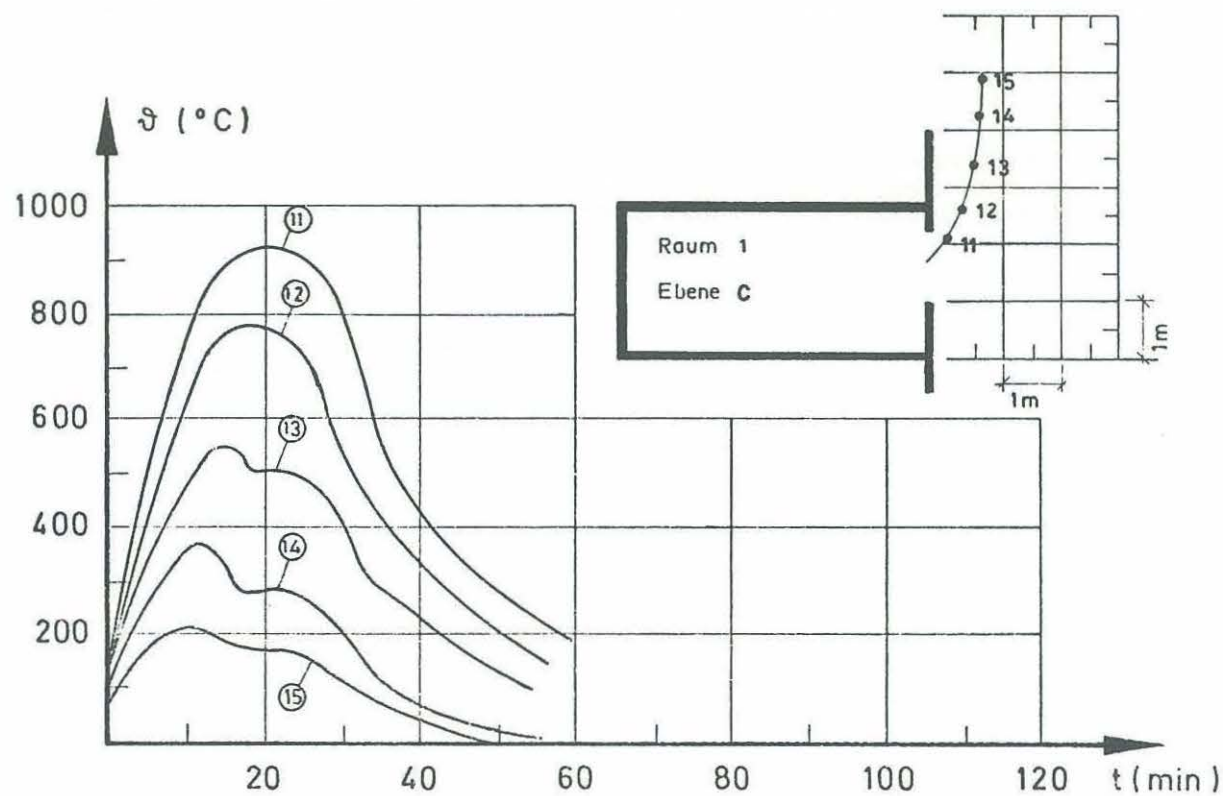


Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Fenstermittelebene)

Anlage zum Versuch 1
Kap. 6.2 Nr. 2

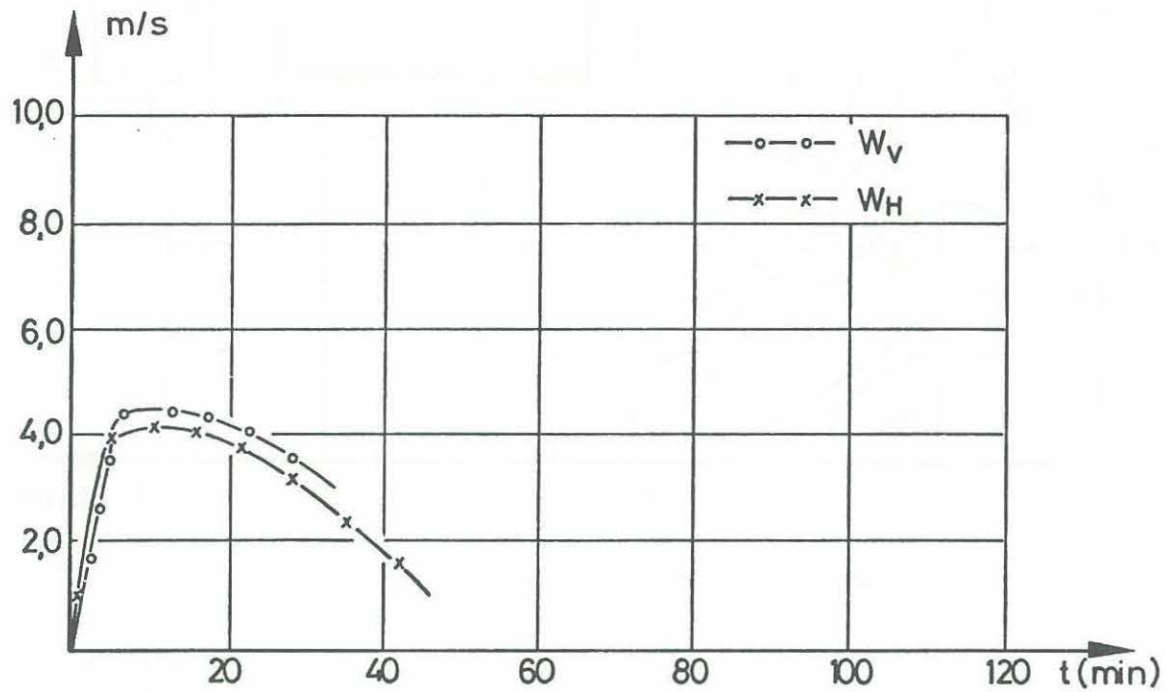


Temperatur im Heißgasstrom (Ebene A)



Temperatur im Heißgasstrom (Ebene C)

Anlage zum Versuch 1
Kap. 6.2 Nr. 3

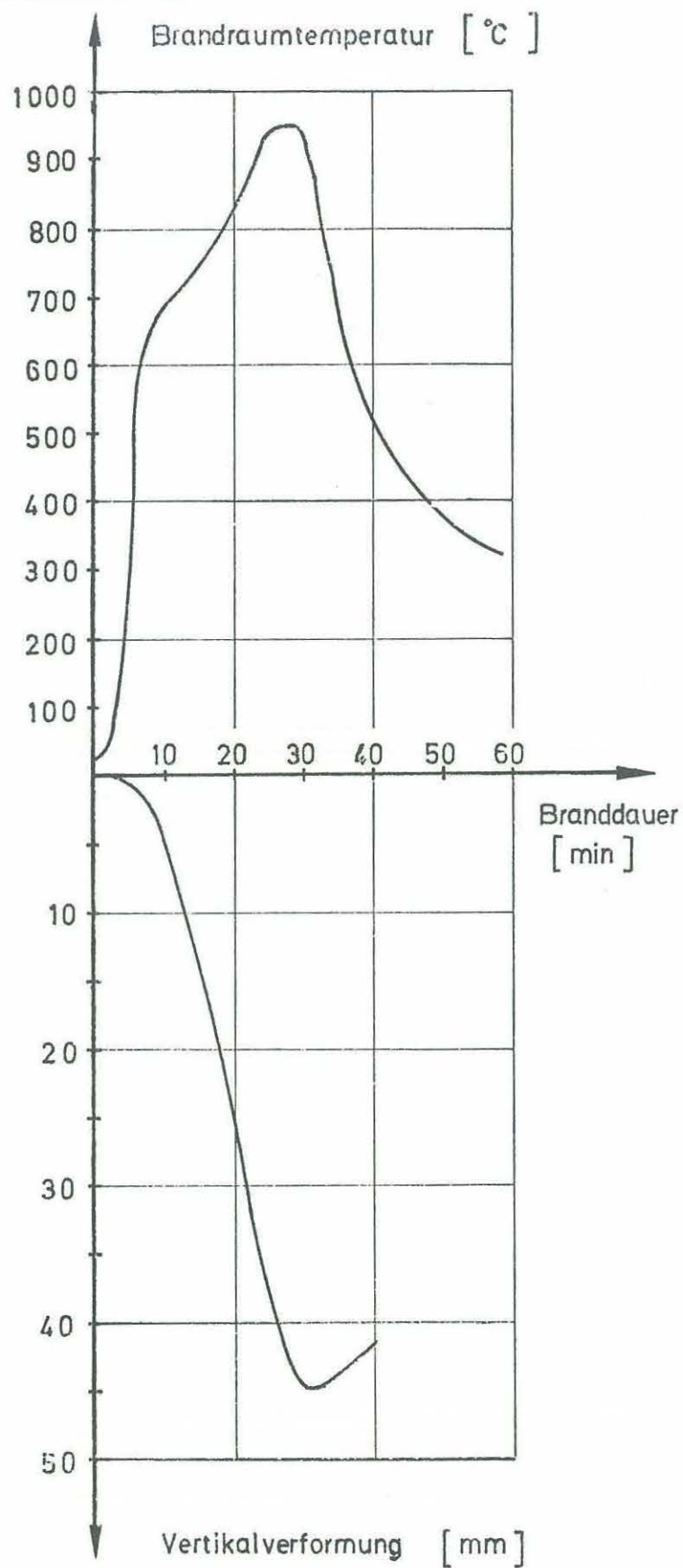


Verlauf der Heißgasgeschwindigkeit

W_H = horizontale Geschwindigkeit 20 cm unter OK Brandraumfenster

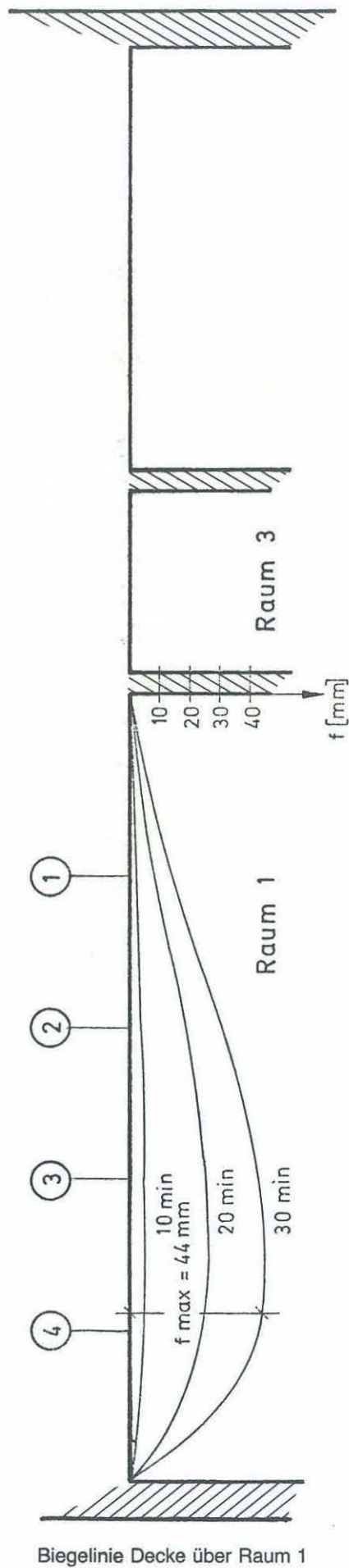
W_V = vertikale Geschwindigkeit 1,5 m über OK Brandraumfenster

Anlage zum Versuch 1
Kap. 6.2 Nr. 4



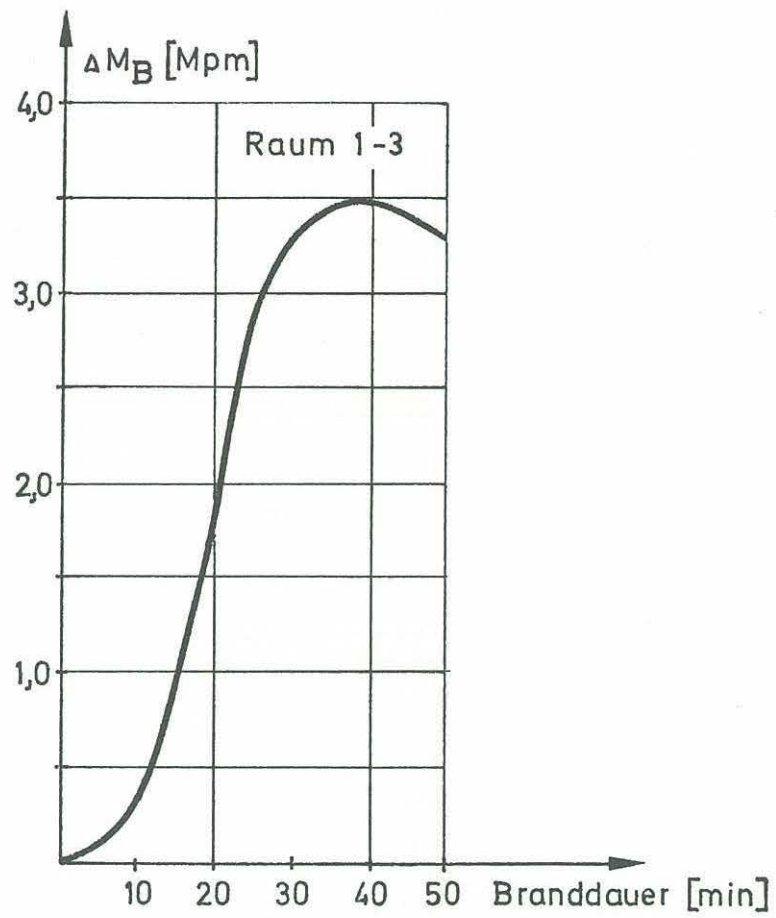
Brandraumtemperaturen, Raum 1, Maximalverformung Decke über Raum 1

Anlage zum Versuch 1
Kap. 7.1 Nr. 1



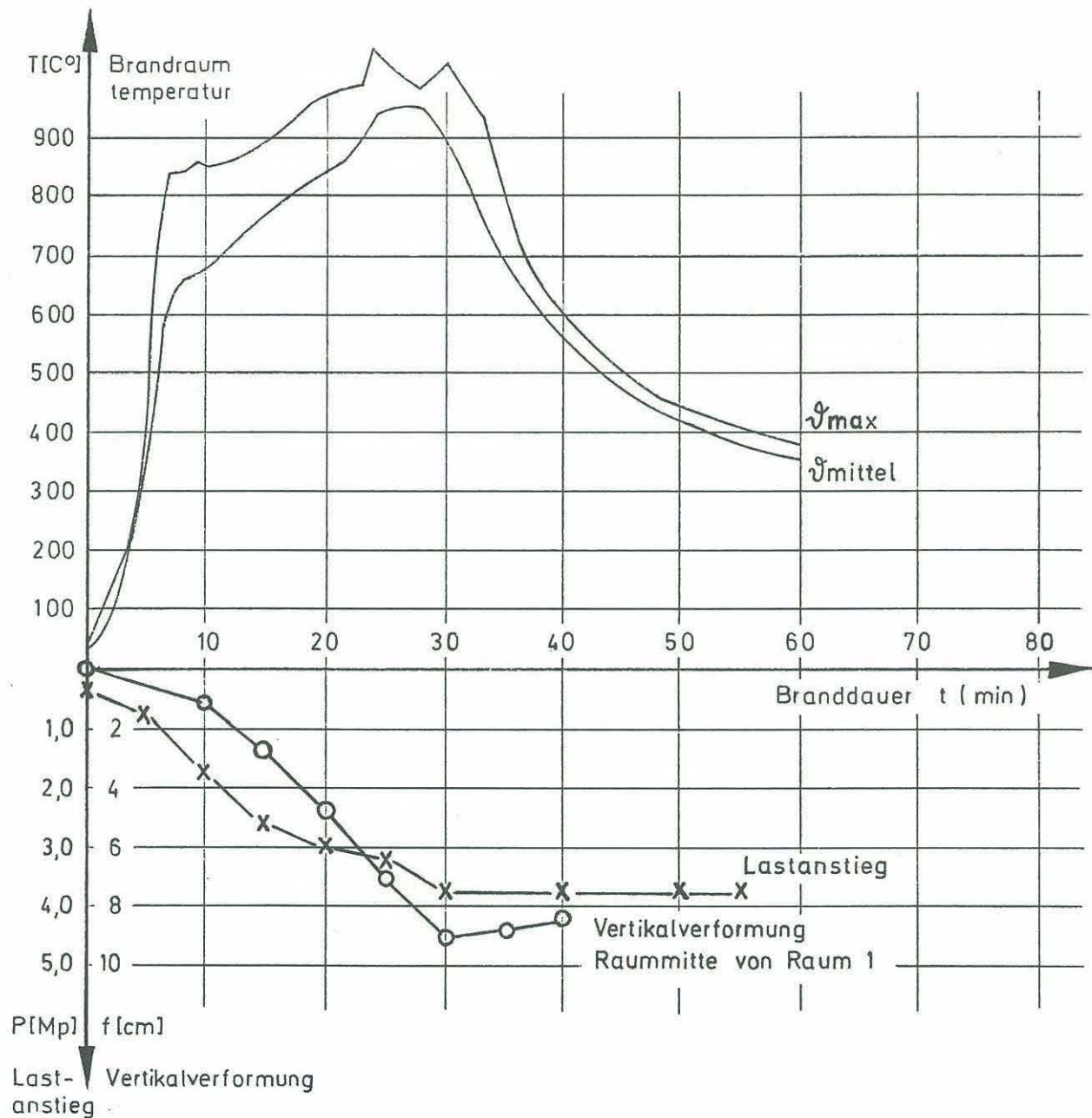
Anlage zum Versuch
Kap. 7.1

1
Nr. 3



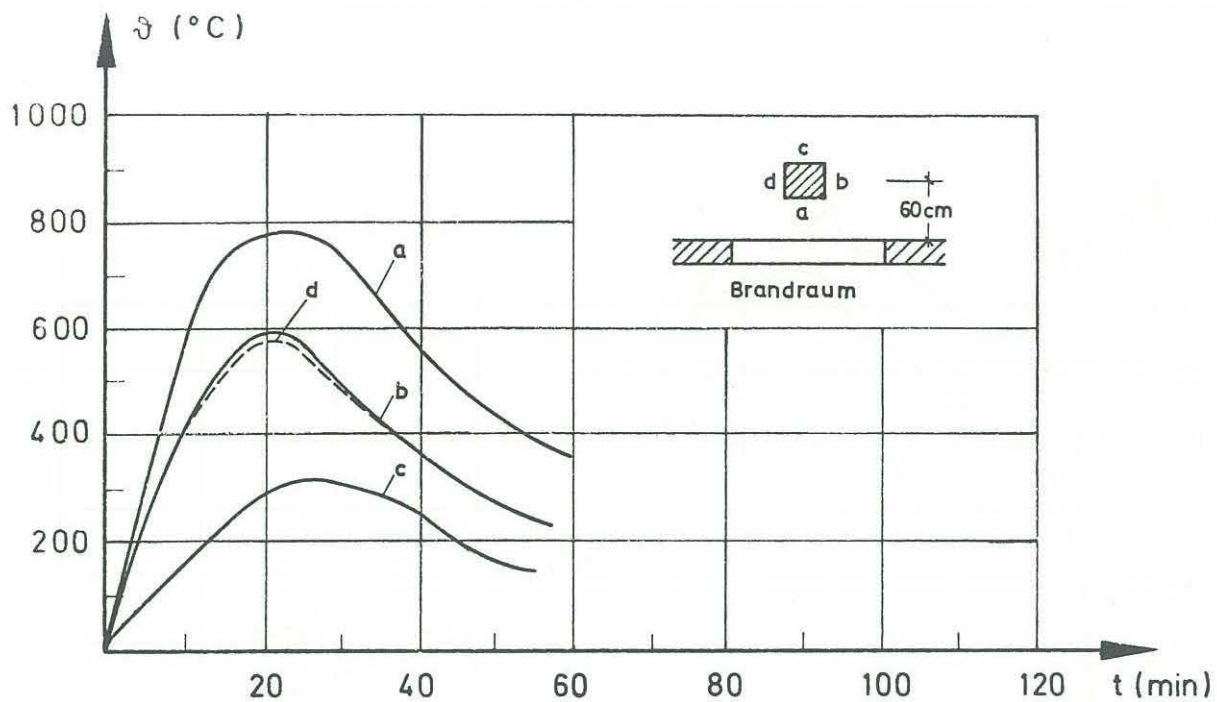
Änderung des Stützmoments der Decke zwischen Raum 1 und 3

Anlage zum Versuch 1
Kap. 7.1 Nr. 4

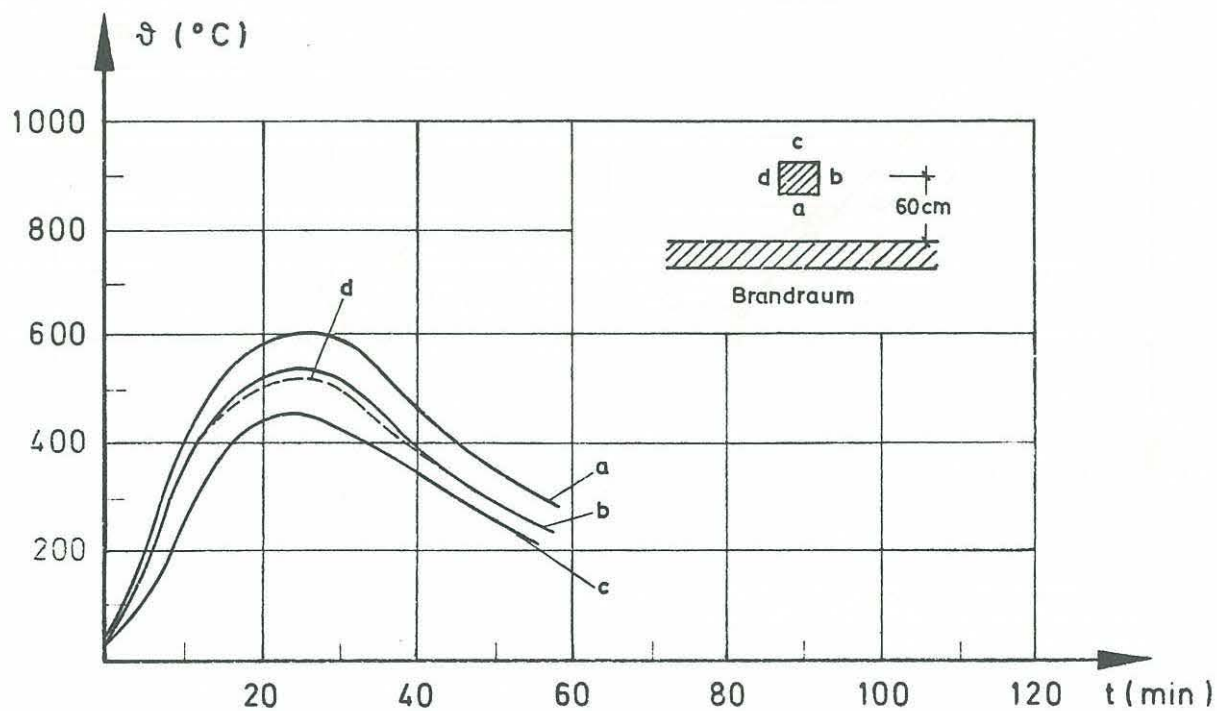


Lastabtragung auf 11,5 cm Wand zwischen Raum 1 und 2
und Brandraumtemperaturen in Wohnung 2

Anlage zum Versuch 1
Kap. 7.2 Nr. 1



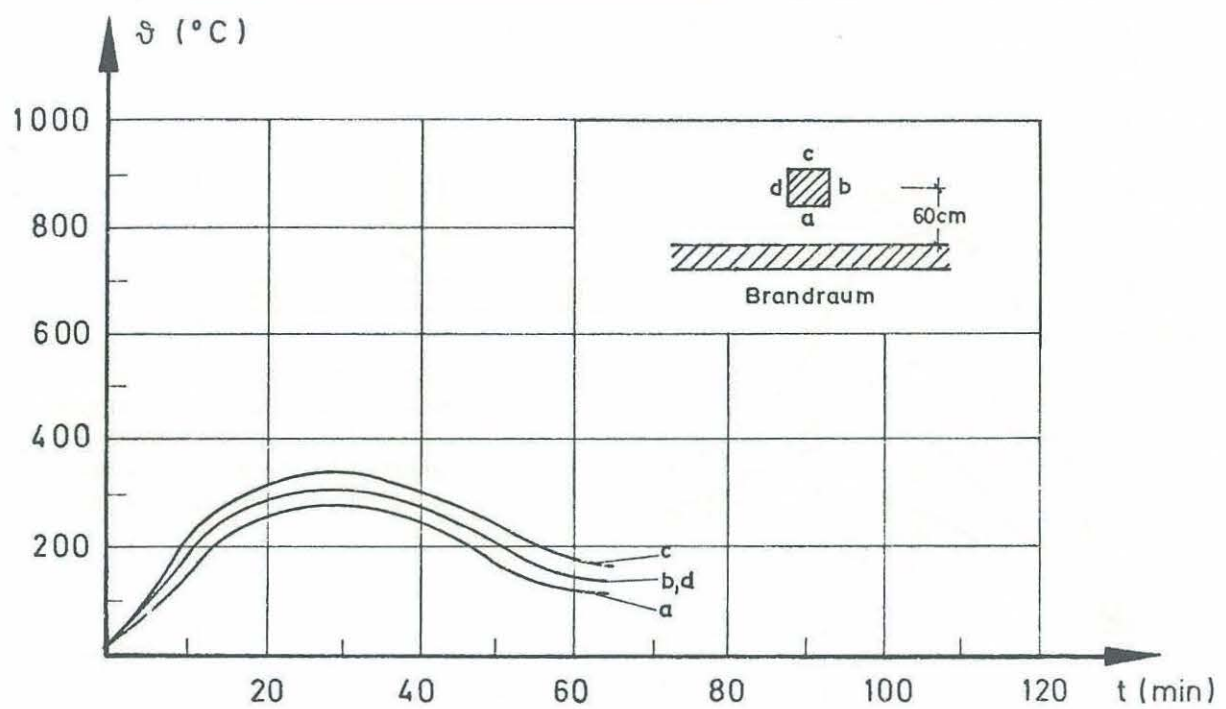
Höhe: 30 cm unter OK Brandraumfenster



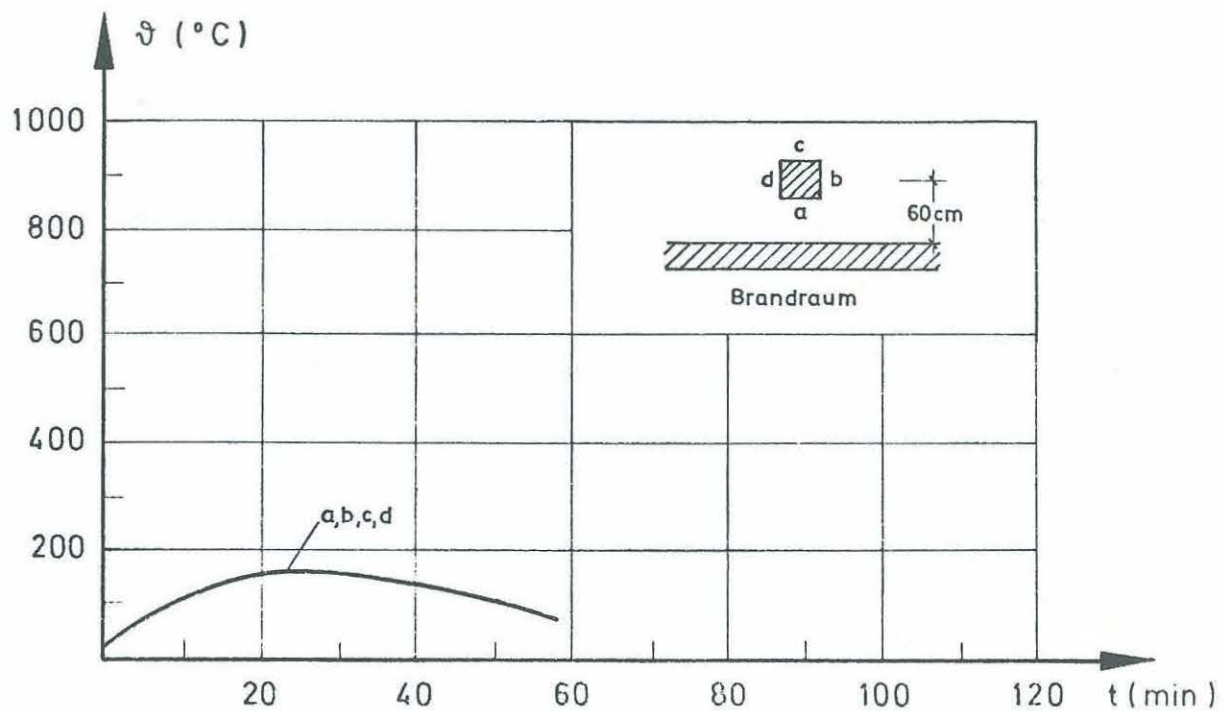
Höhe: 70 cm über OK Brandraumfenster

Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonstütze
($a = 24$ cm, $b = 24$ cm)

Anlage zum Versuch 1
Kap. 8.4 Nr. 1



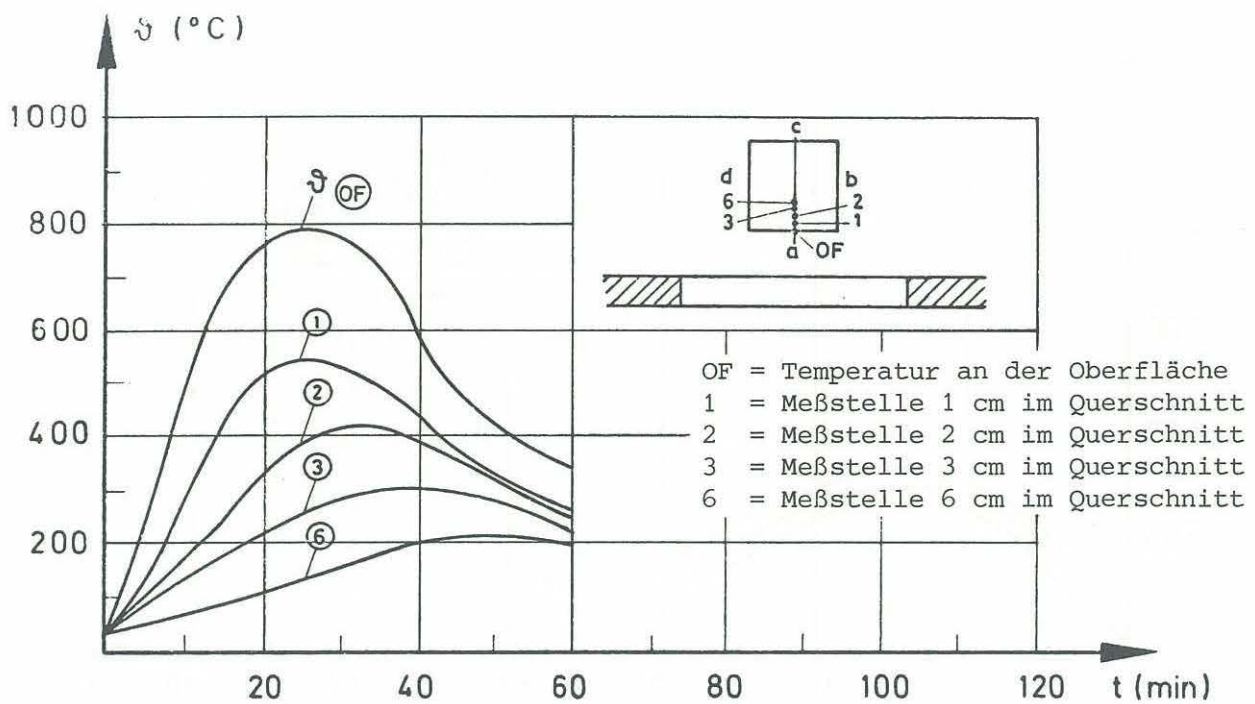
Höhe: 170 cm über OK Brandraumfenster



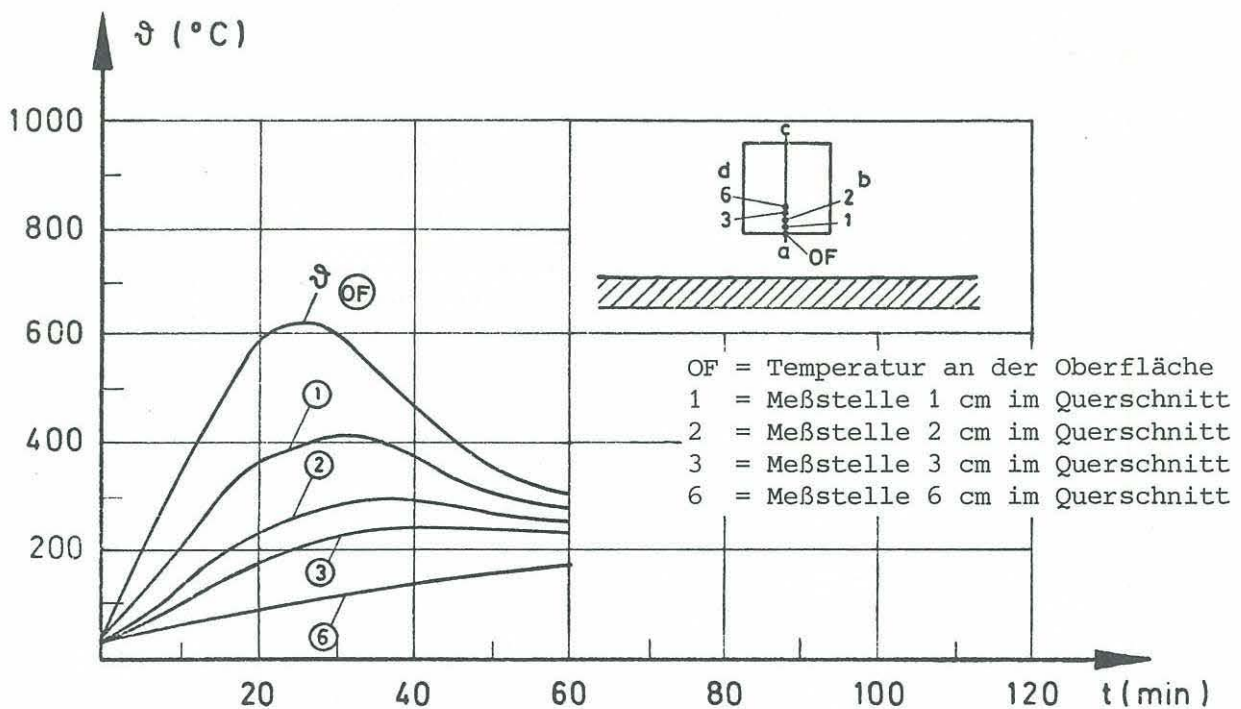
Höhe: 270 cm über OK Brandraumfenster

Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonstütze
(a = 24 cm, b = 24 cm)

Anlage zum Versuch 1
Kap. 8.4 Nr. 2



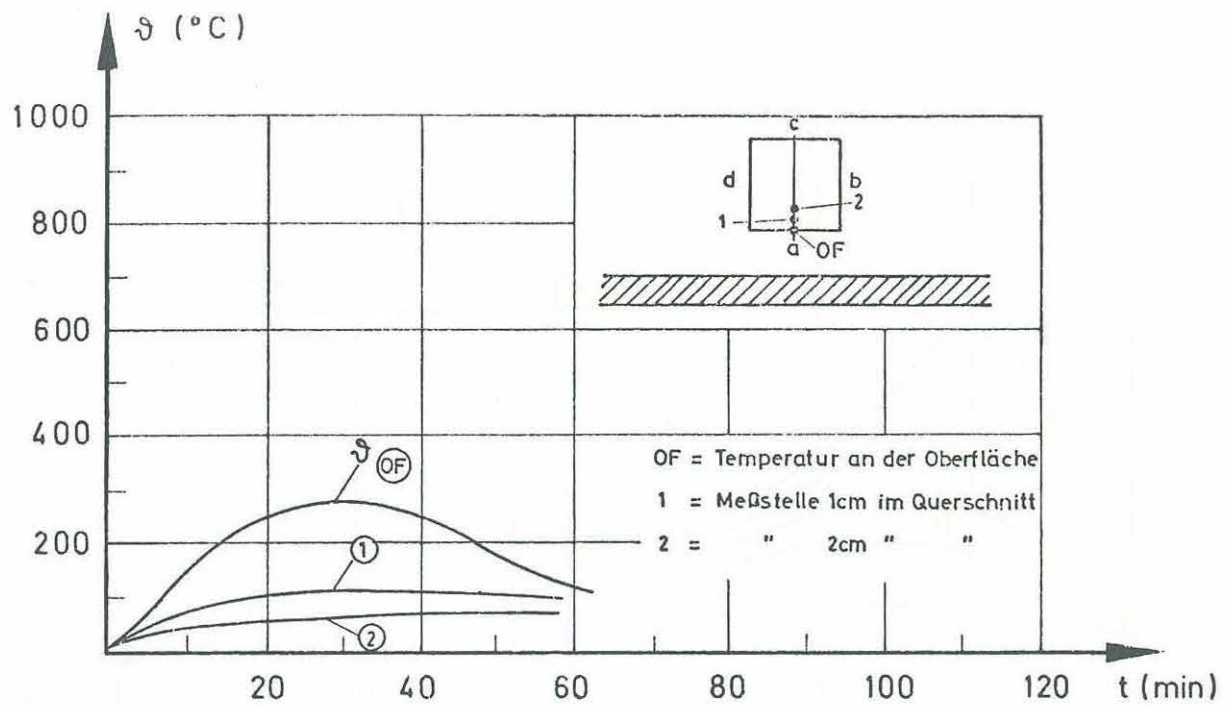
Höhe des Querschnitts: 30 cm unter OK Brandraumfenster Seite a



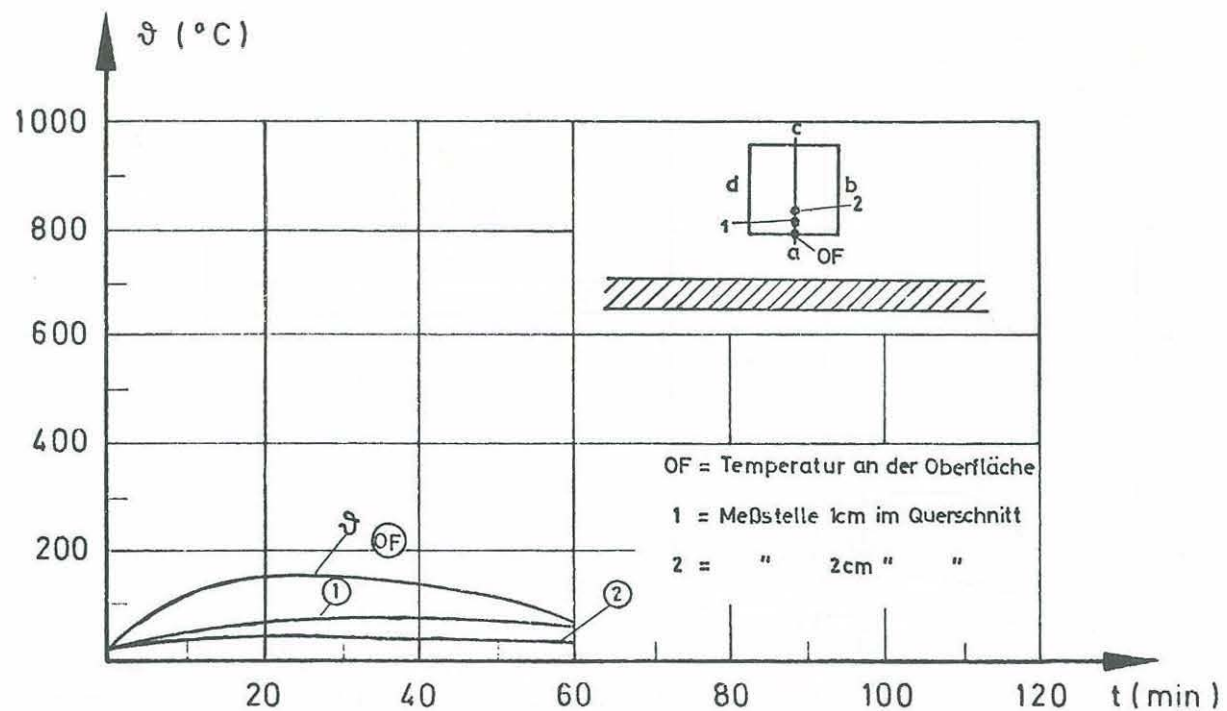
Höhe des Querschnitts: 70 cm über OK Brandraumfenster Seite a

Temperaturen in verschiedenen Punkten im Querschnitt der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch 1
Kap. 8.4 Nr. 3



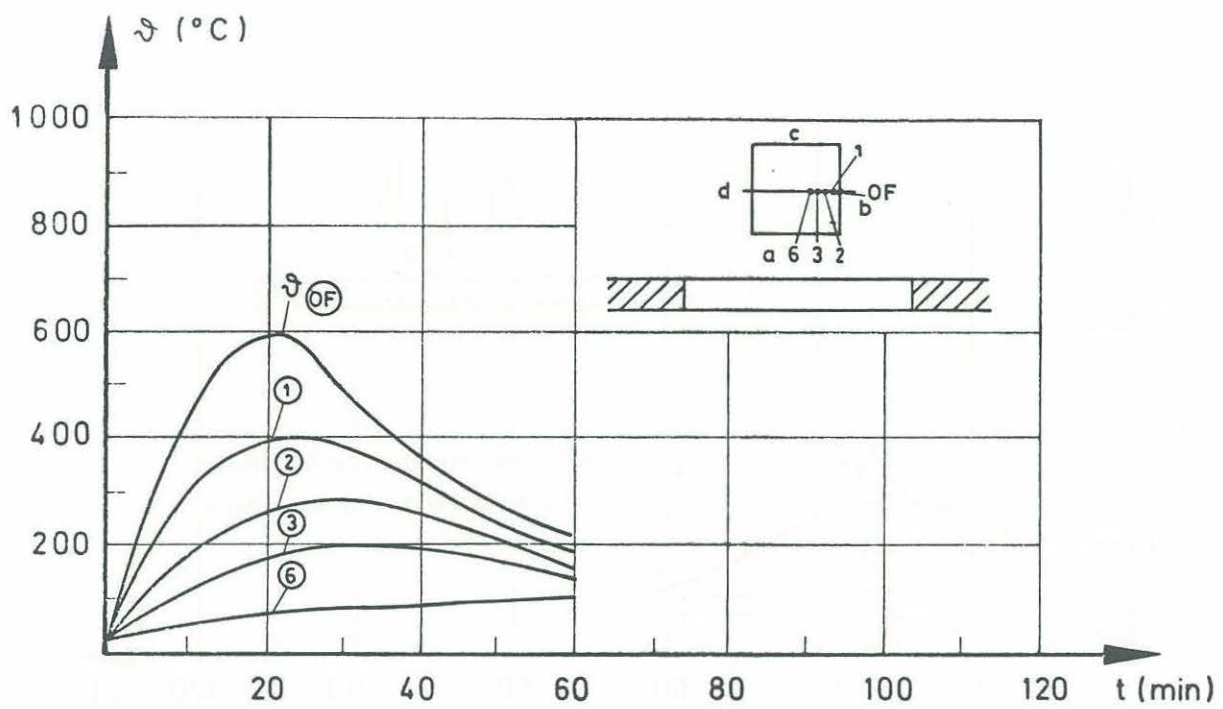
Höhe des Querschnitts: 170 cm über OK Brandraumfenster, Seite a



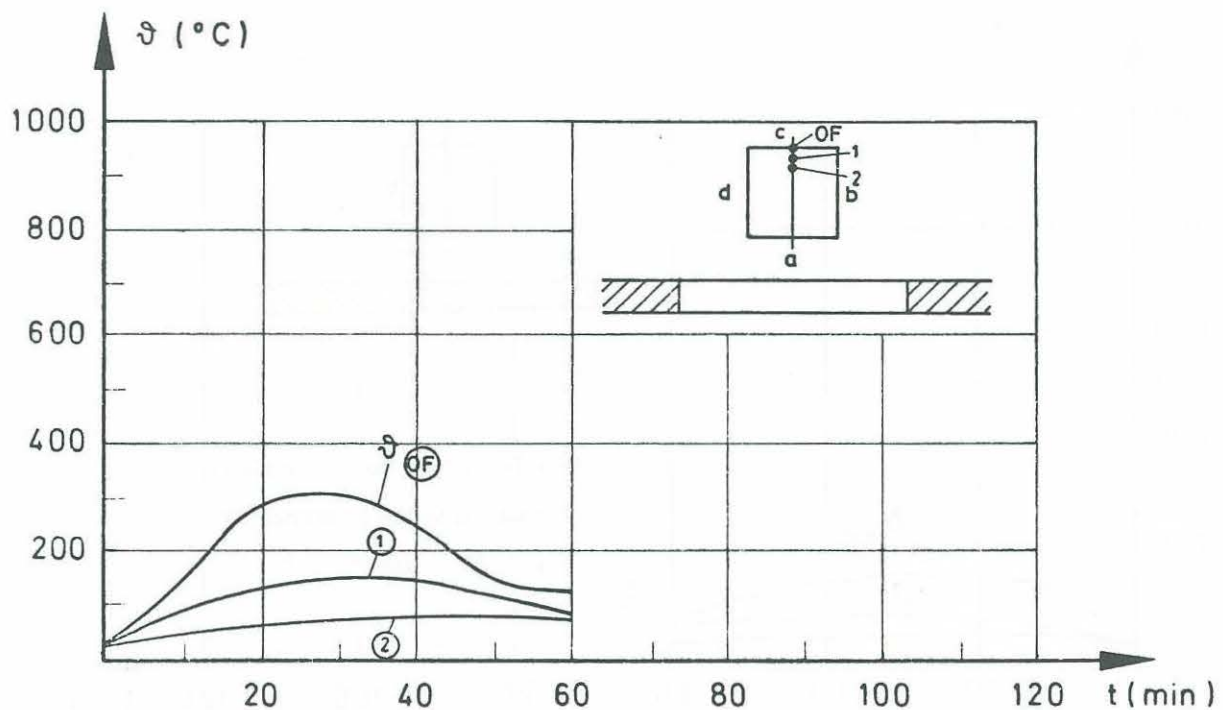
Höhe des Querschnitts: 270 cm über OK Brandraumfenster, Seite a

Temperaturen in verschiedenen Punkten im Querschnitt der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch 1
Kap. 8.4 Nr. 4



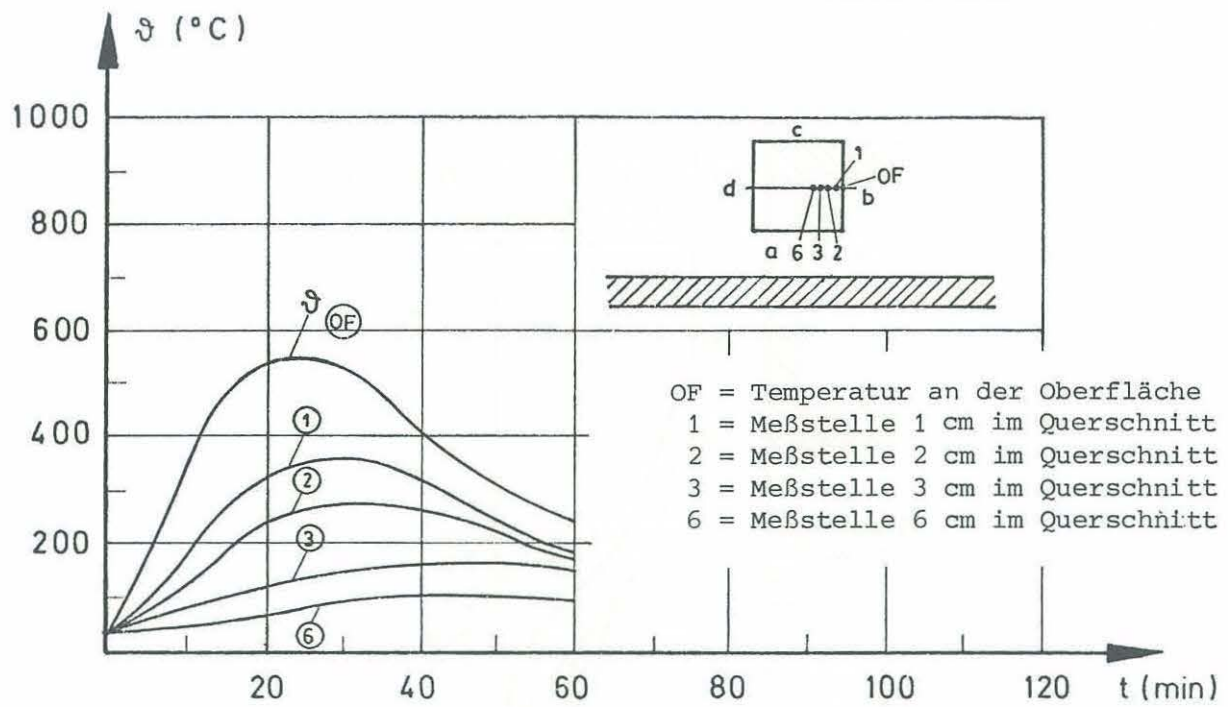
Höhe des Querschnitts: 30 cm unter OK Brandraumfenster, Seite b



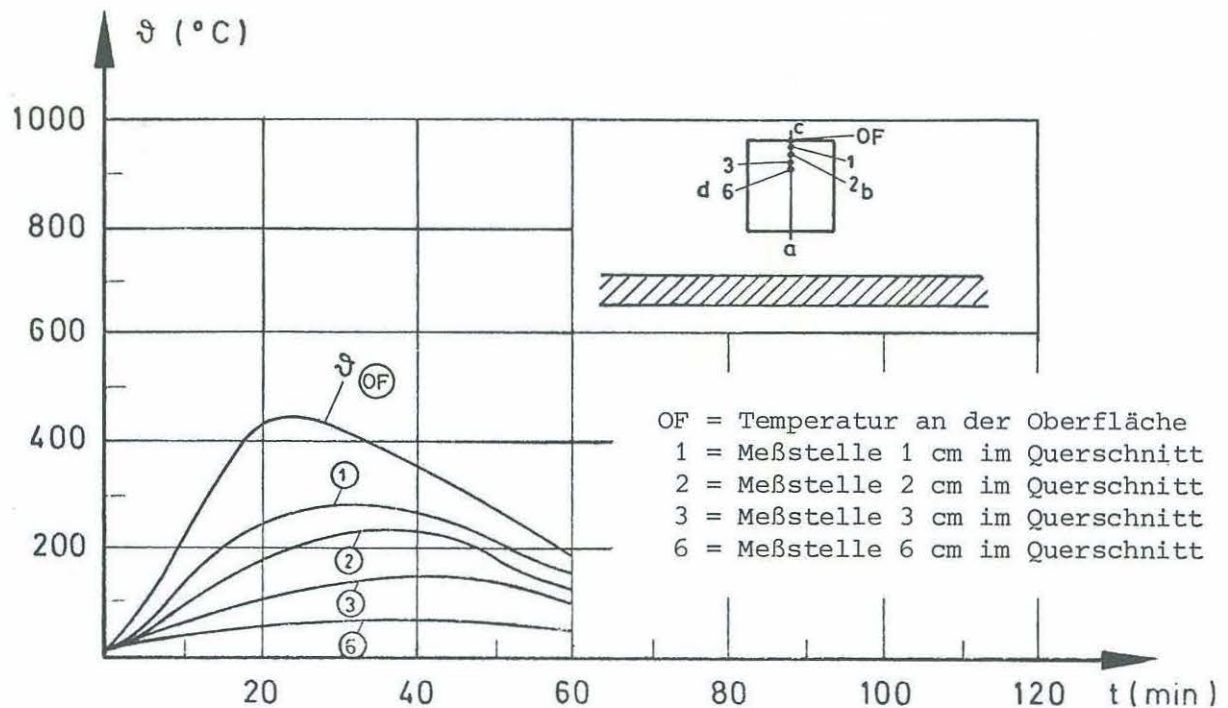
Höhe des Querschnitts: 30 cm unter OK Brandraumfenster, Seite c

Temperaturen in verschiedenen Punkten im Querschnitt der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch 1
Kap. 8.4 Nr. 5

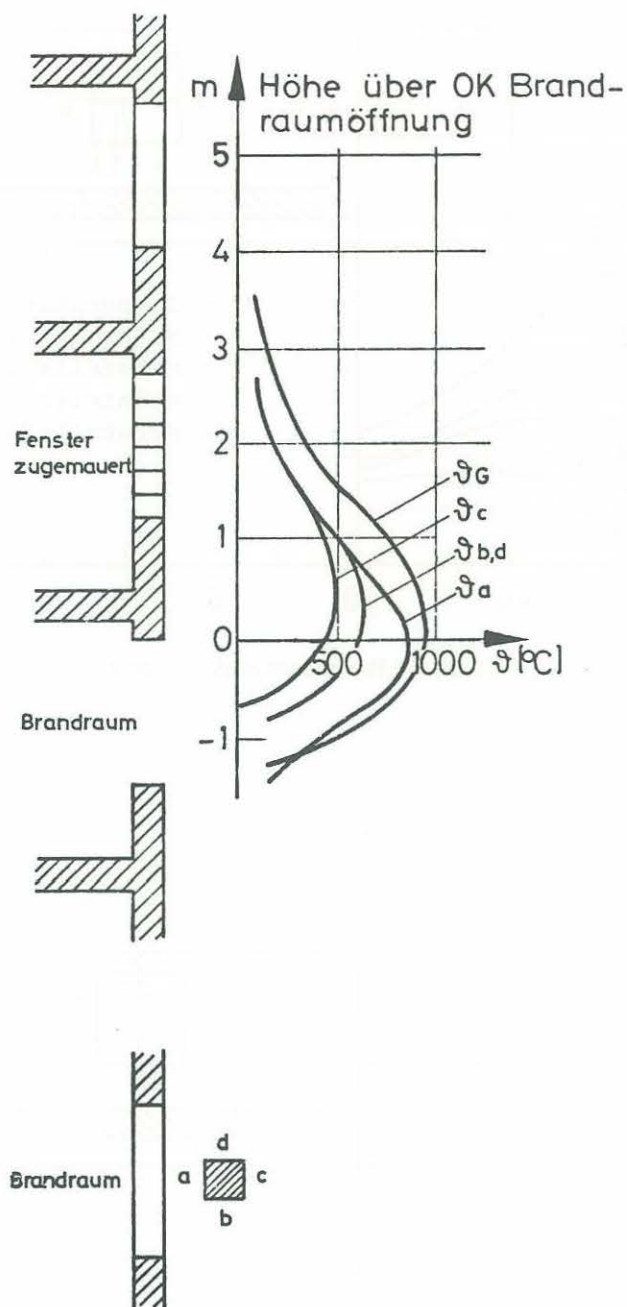


Höhe des Querschnitts: 70 cm über OK Brandraumfenster, Seite b

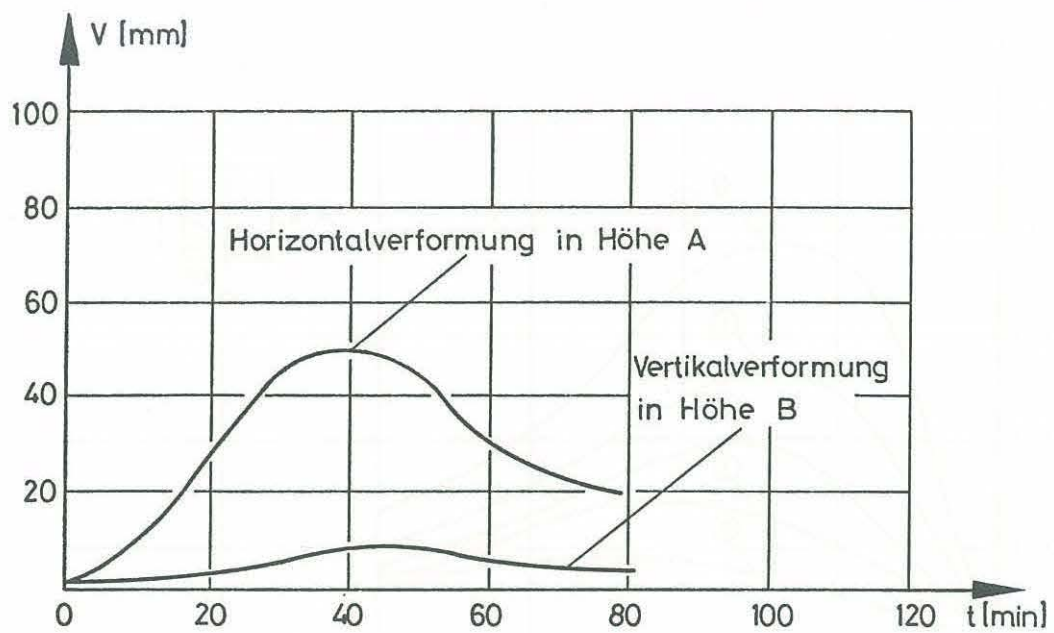


Höhe des Querschnitts: 70 cm über OK Brandraumfenster, Seite c

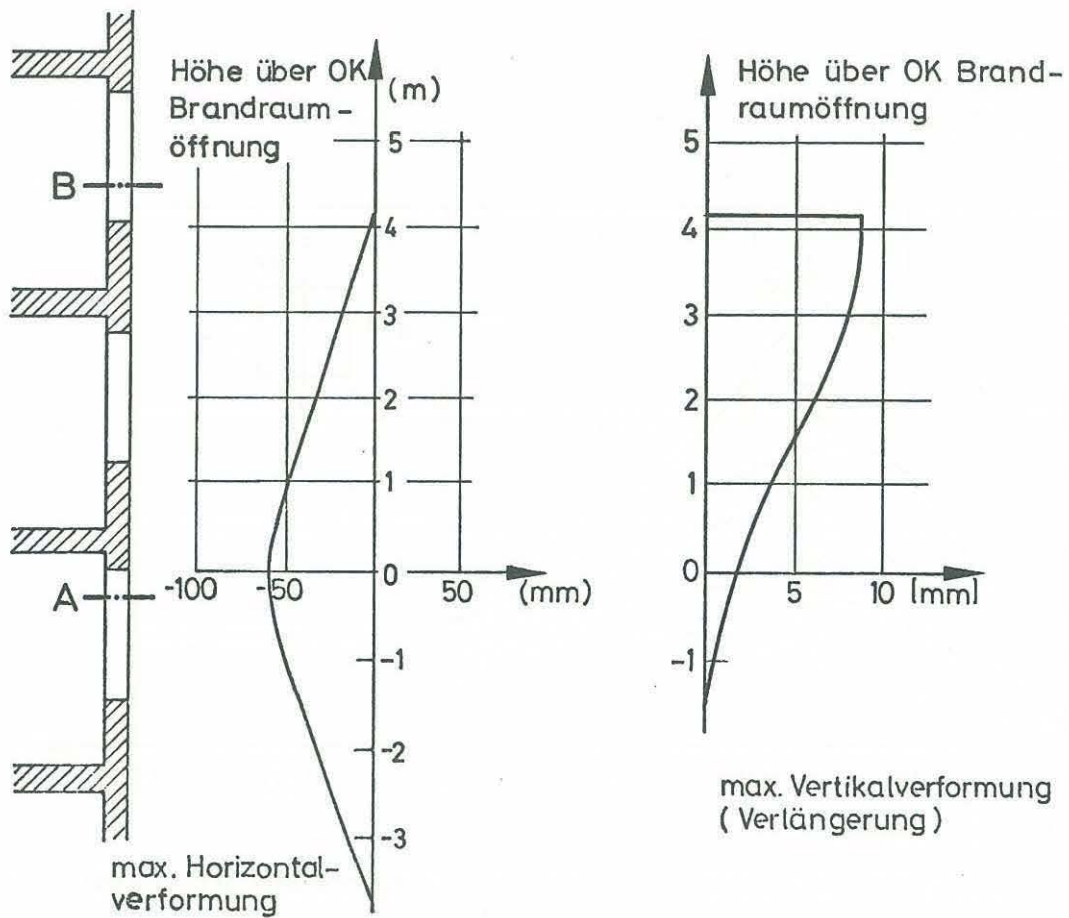
Temperaturen in verschiedenen Punkten im Querschnitt der Stahlbetonaußenstütze



Maximale Heißgastemperatur Θ_G und maximale Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonaußenstütze

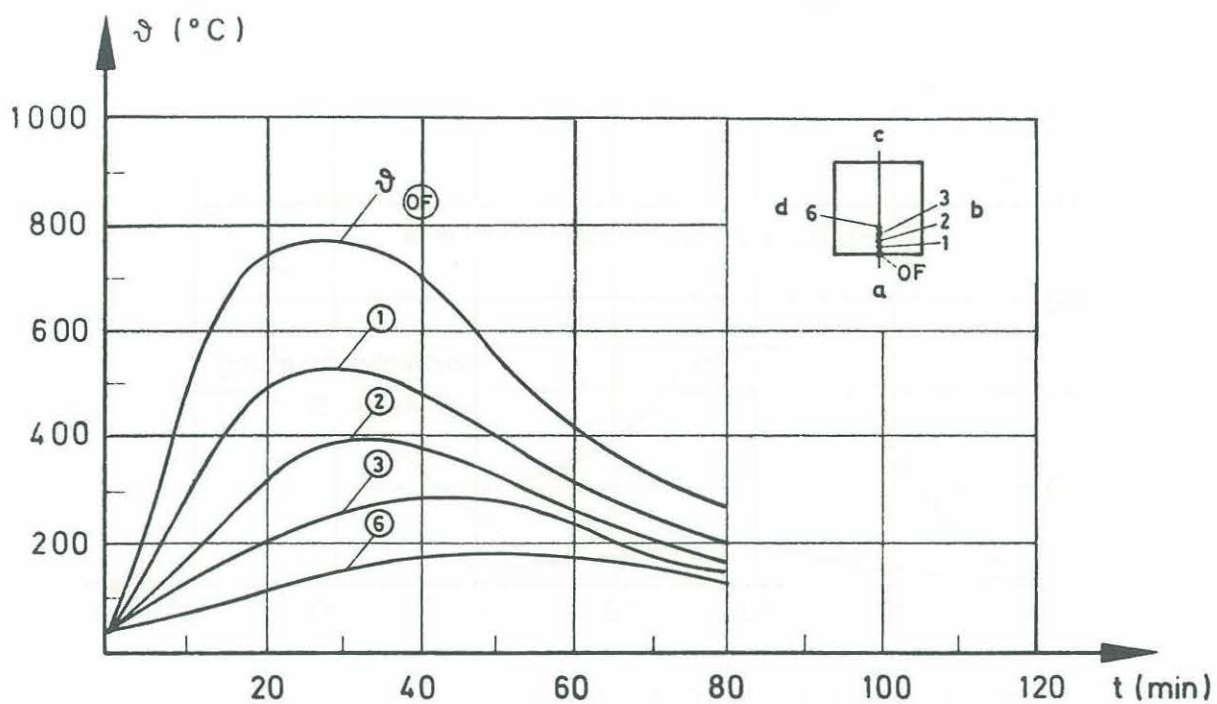


Zeit-Verformungslinien in Höhe der Punkte A und B

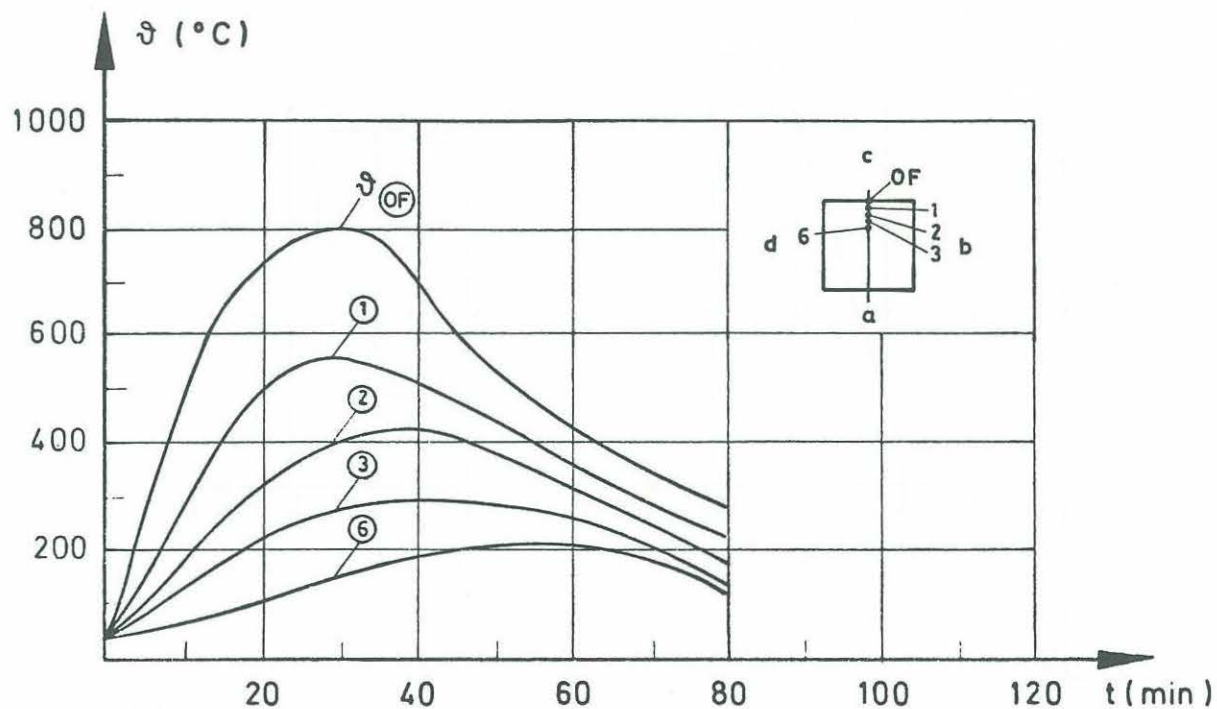


Maximale Verformungen der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch 1
Kap. 8.4 Nr. 8



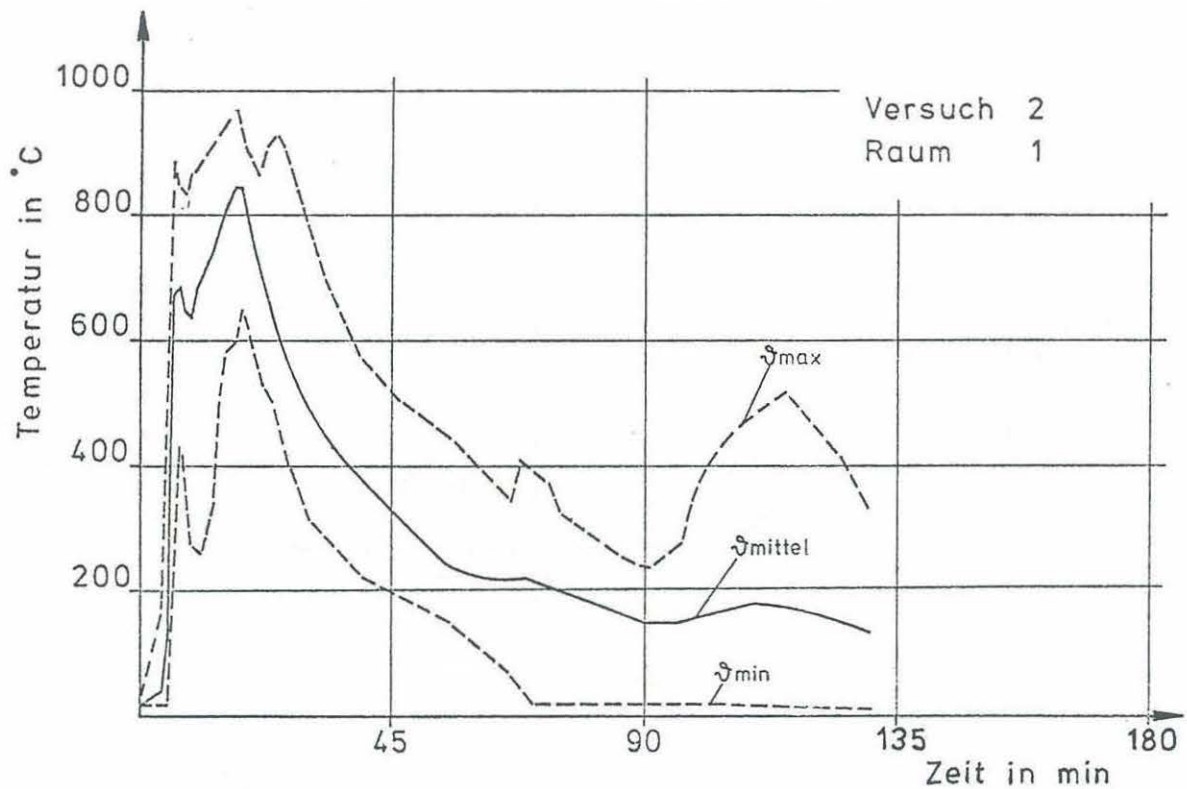
Meßlinie der Seite a



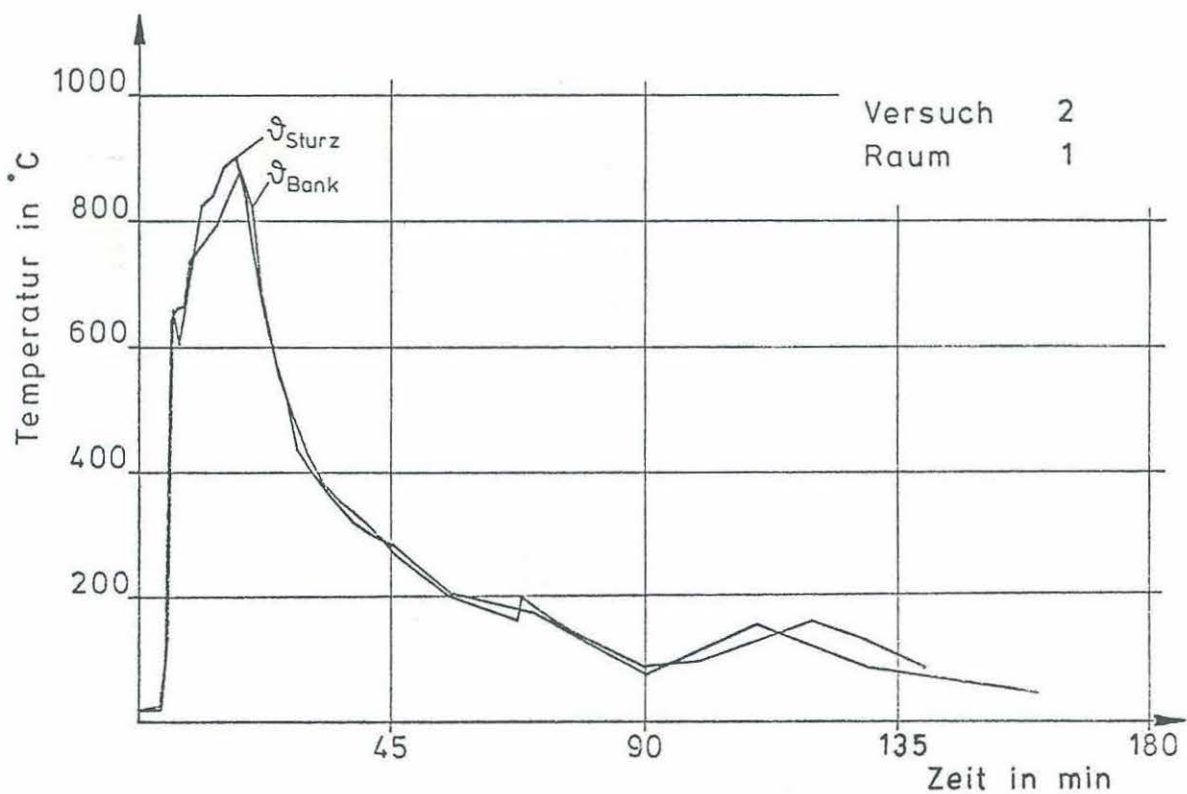
Meßlinie der Seite c

Temperaturen auf der Symmetrieachse eines Vergleichsbauteils (Stützenstummel 24×24 cm, $l = 80$ cm), das etwa in Brandraummitte stand.

Anlage zum Versuch 1
Kap. 8.4 Nr. 9

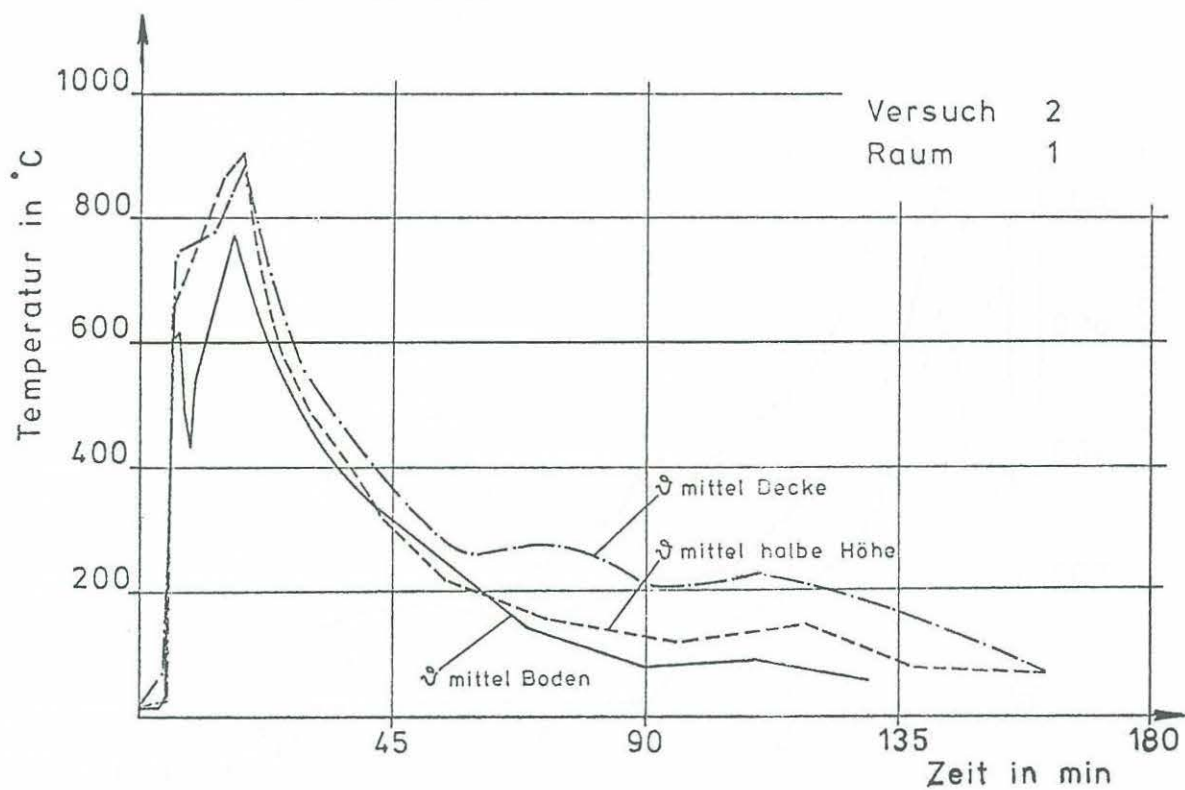


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

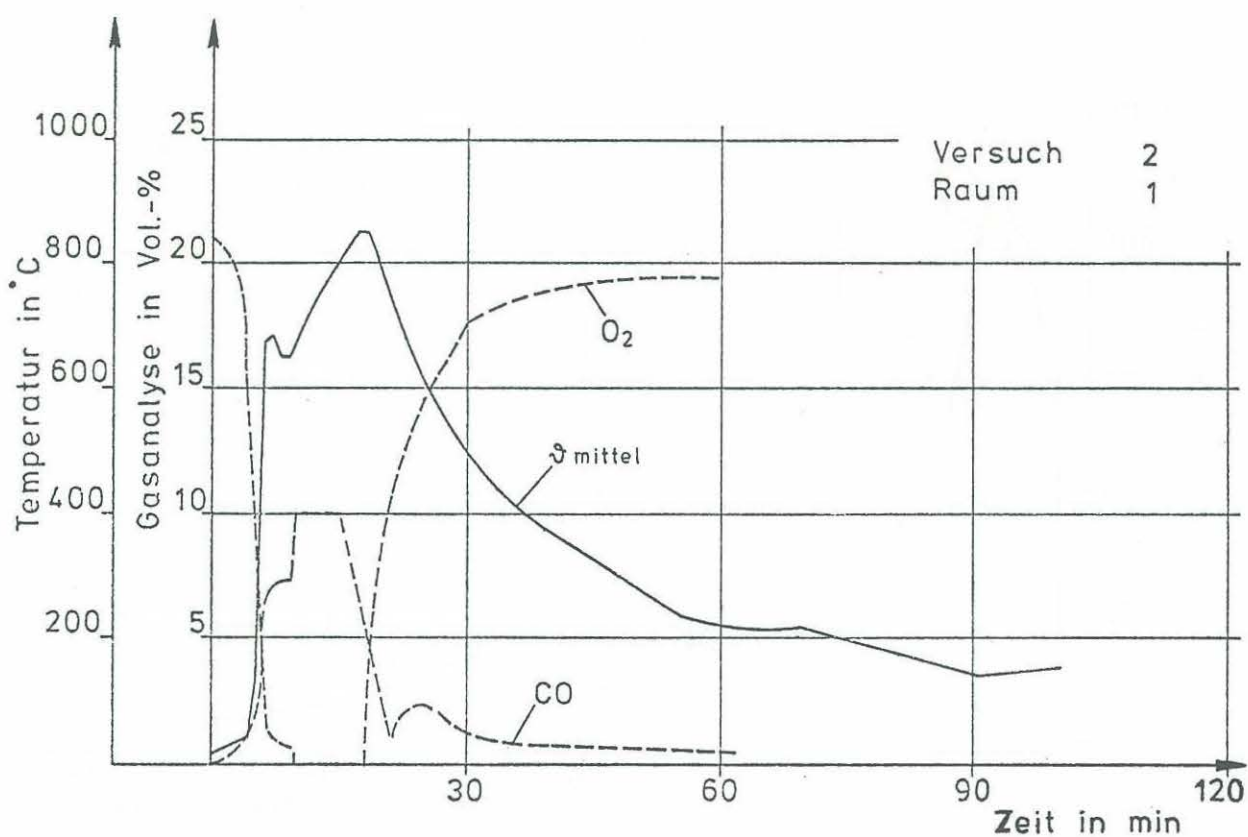


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2

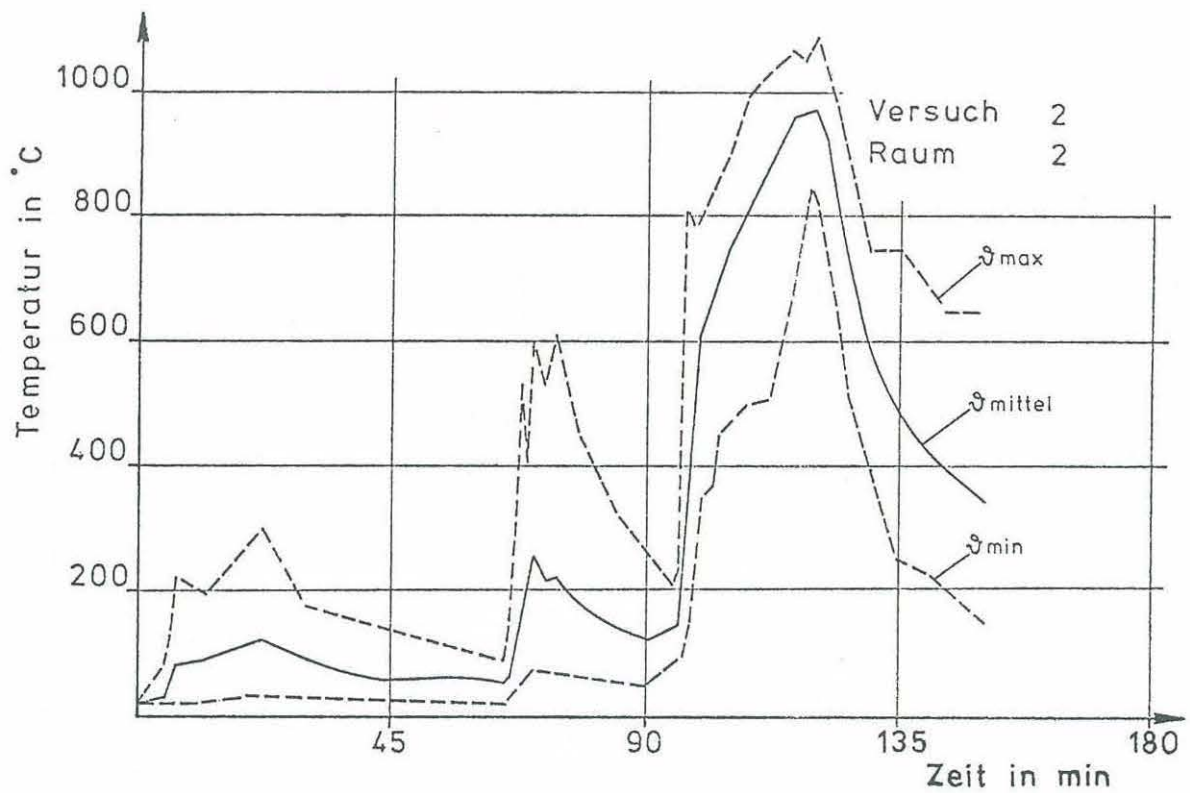


Temperaturschichtung gemessen in drei horizontalen Ebenen

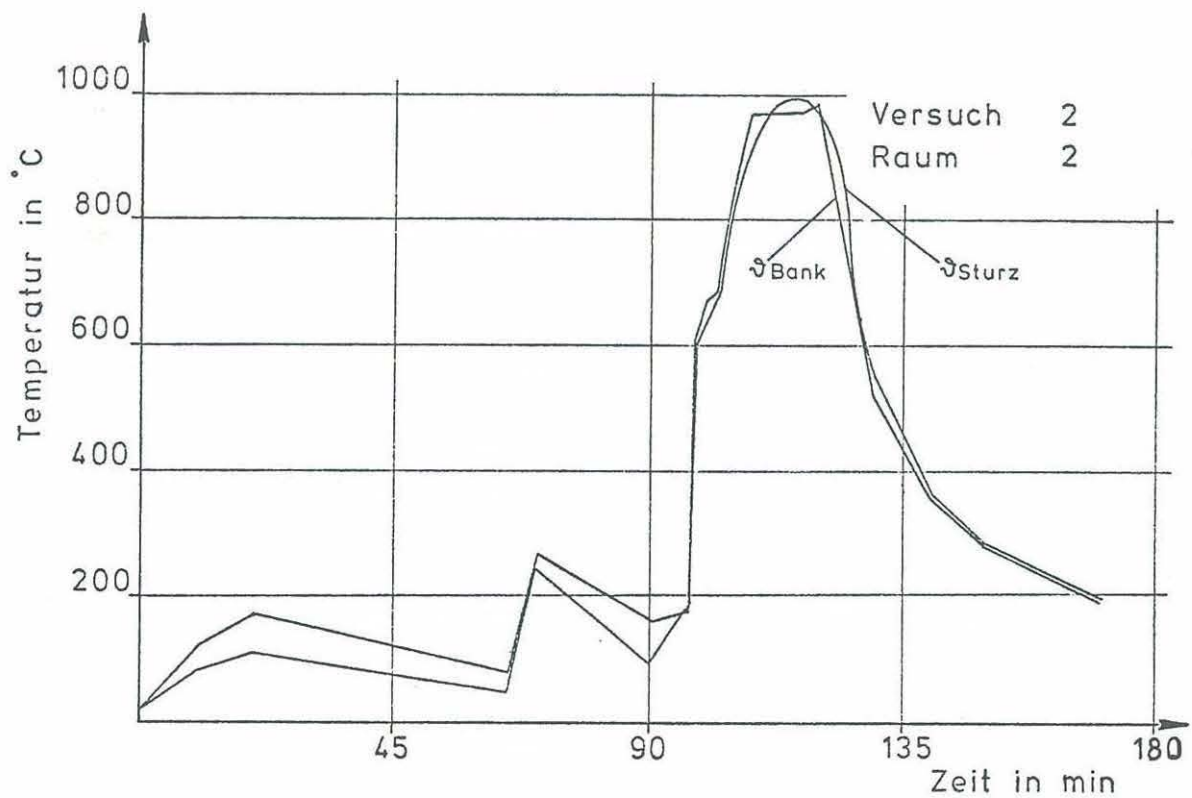


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4

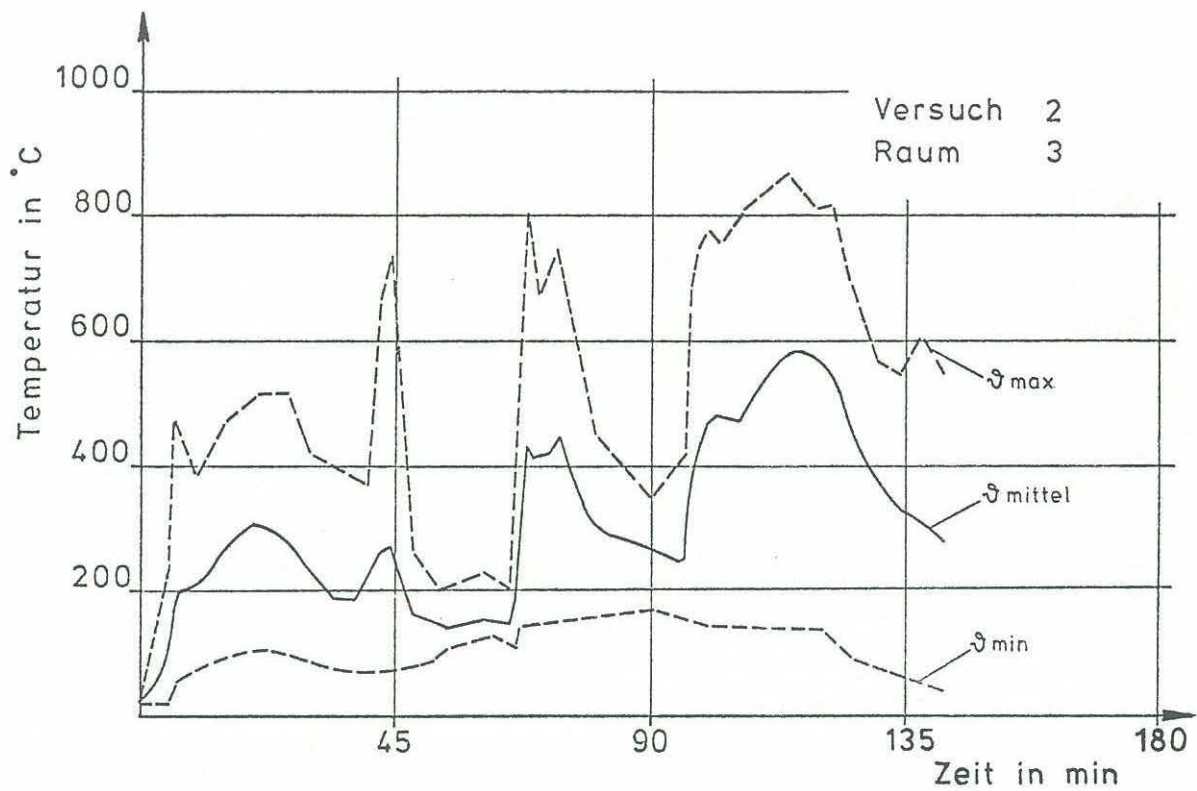


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

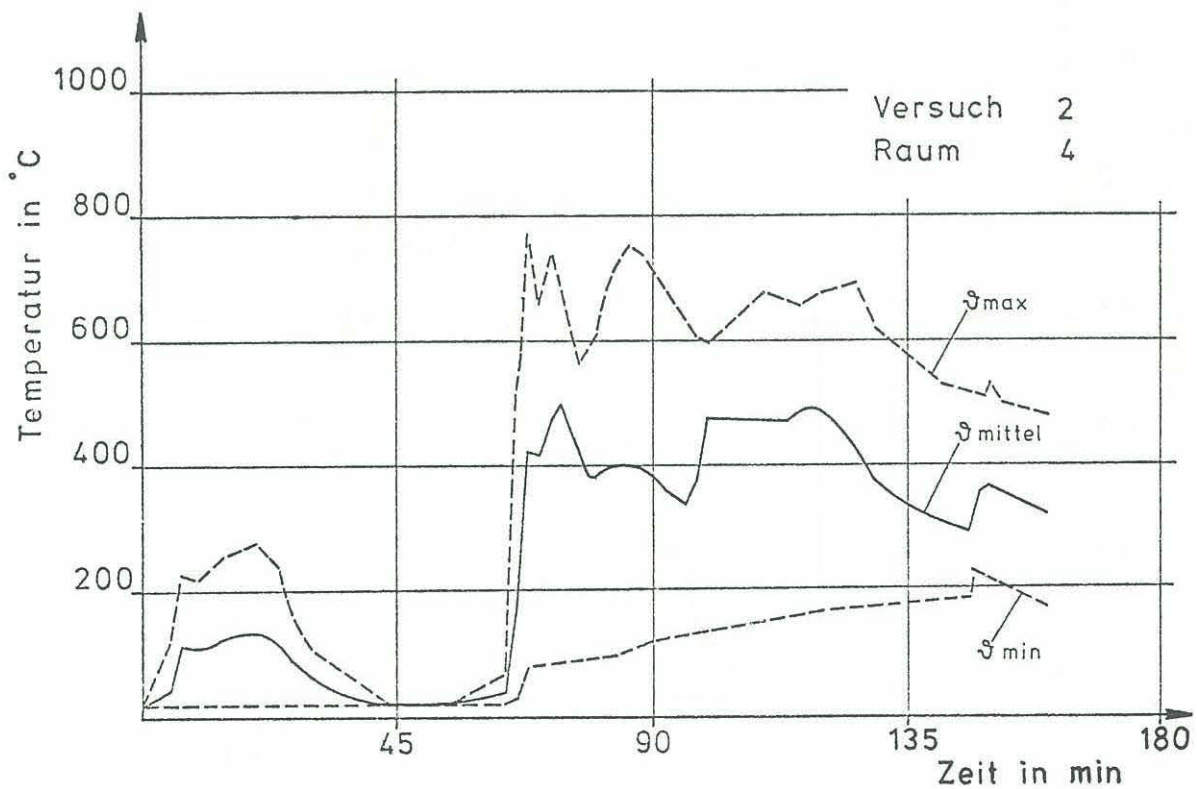


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.1 Nr. 5
Kap. 6.1 Nr. 6

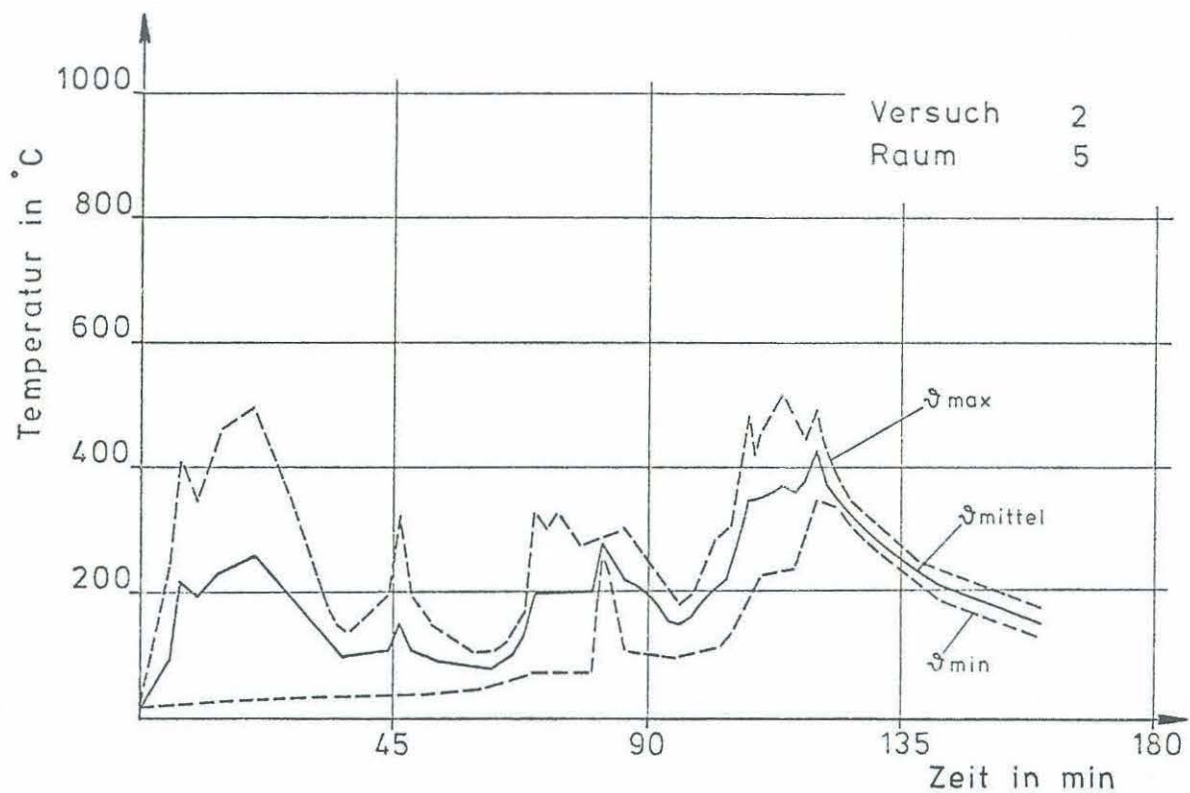


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

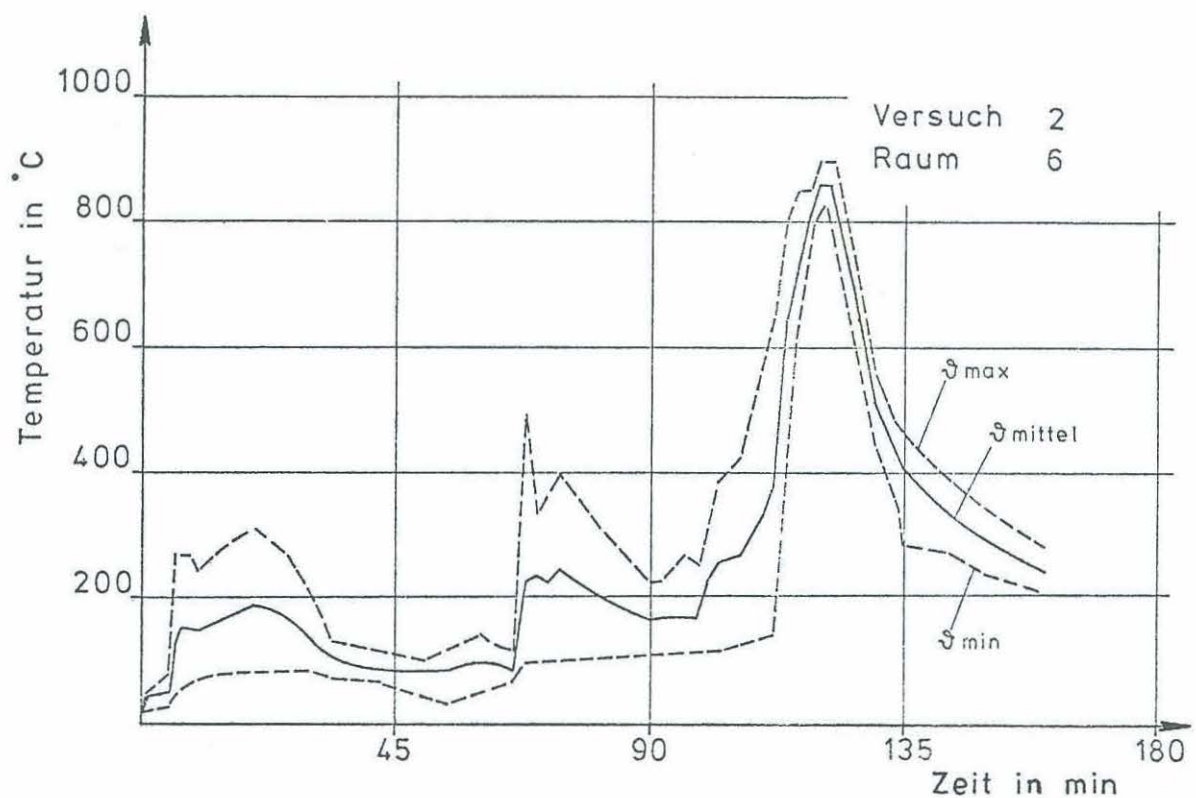


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.1 Nr. 7
Kap. 6.1 Nr. 8

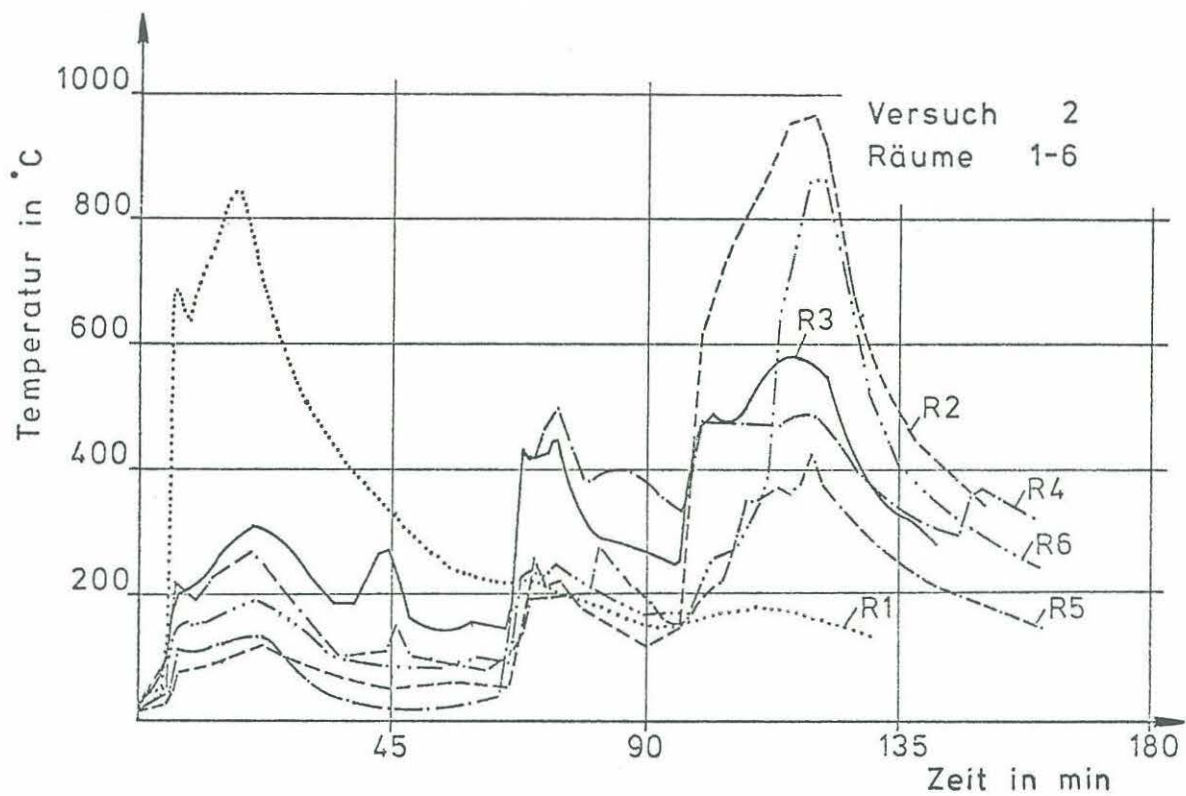


Temperaturstrebereich in einem Brandraum

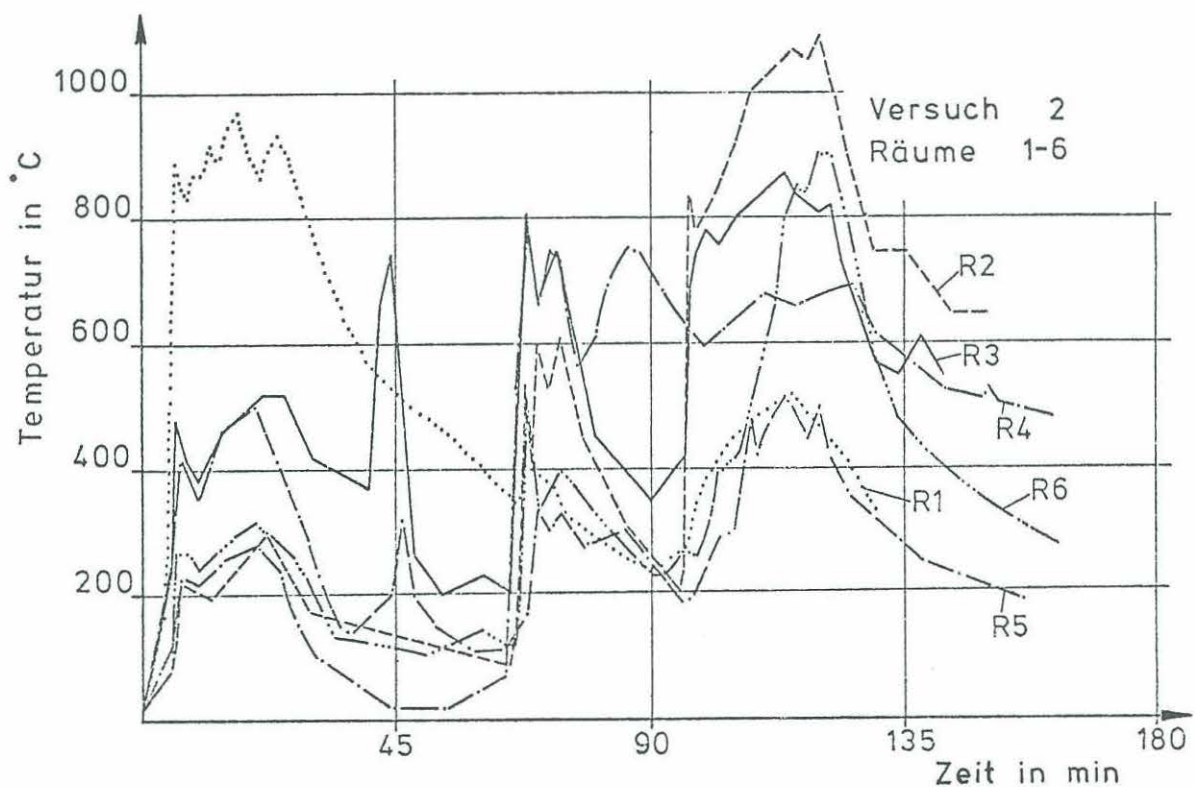


Temperaturstrebereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.1 Nr. 9
Kap. 6.1 Nr. 10

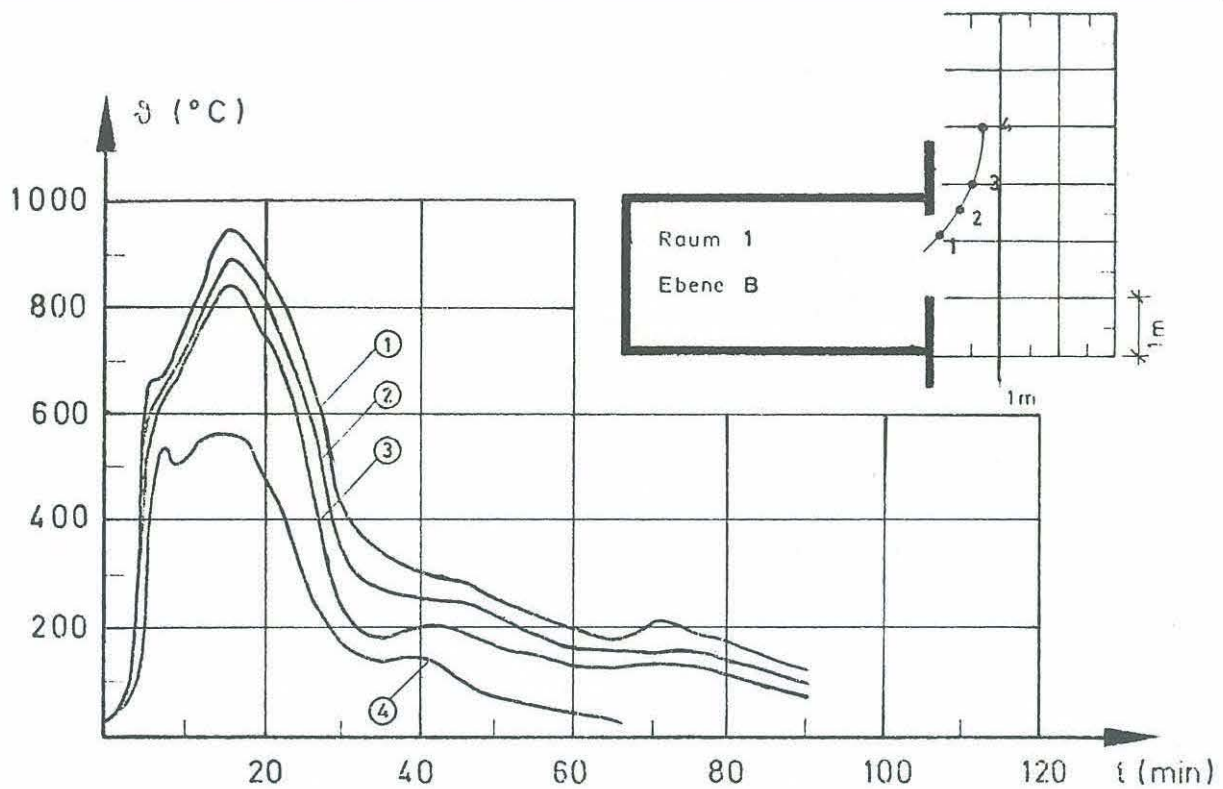


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

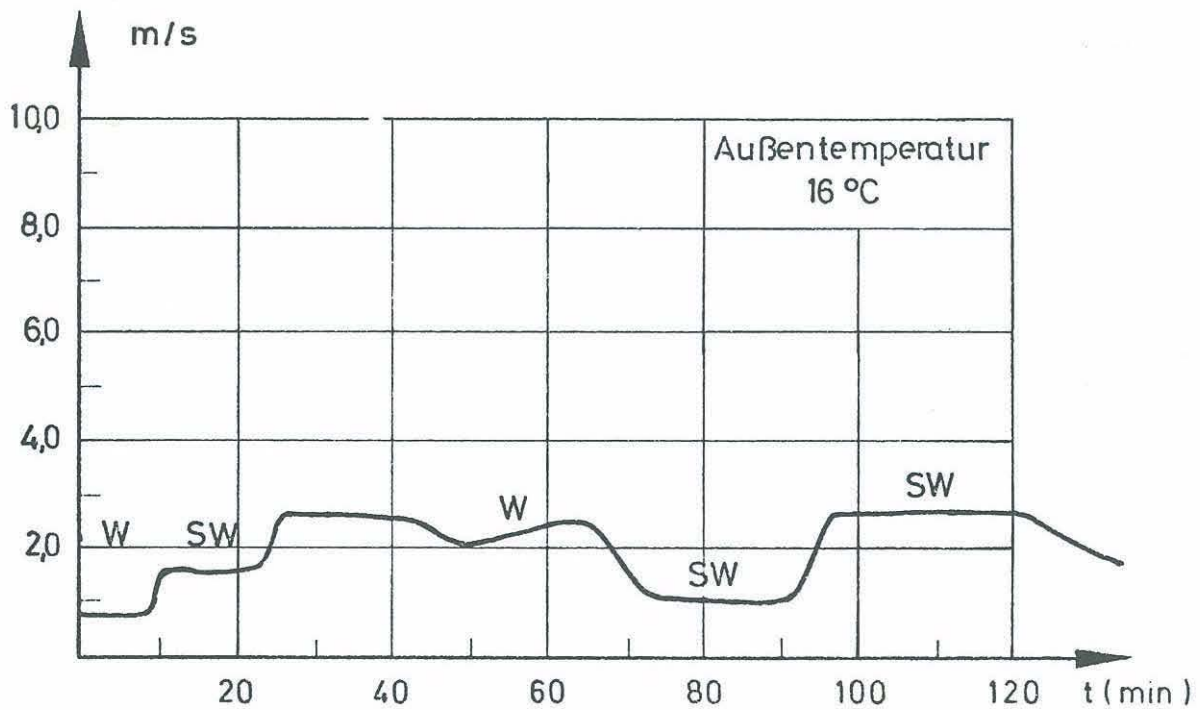


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (maximale Brandraumtemperaturen)

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.1 Nr. 11
Kap. 6.1 Nr. 12

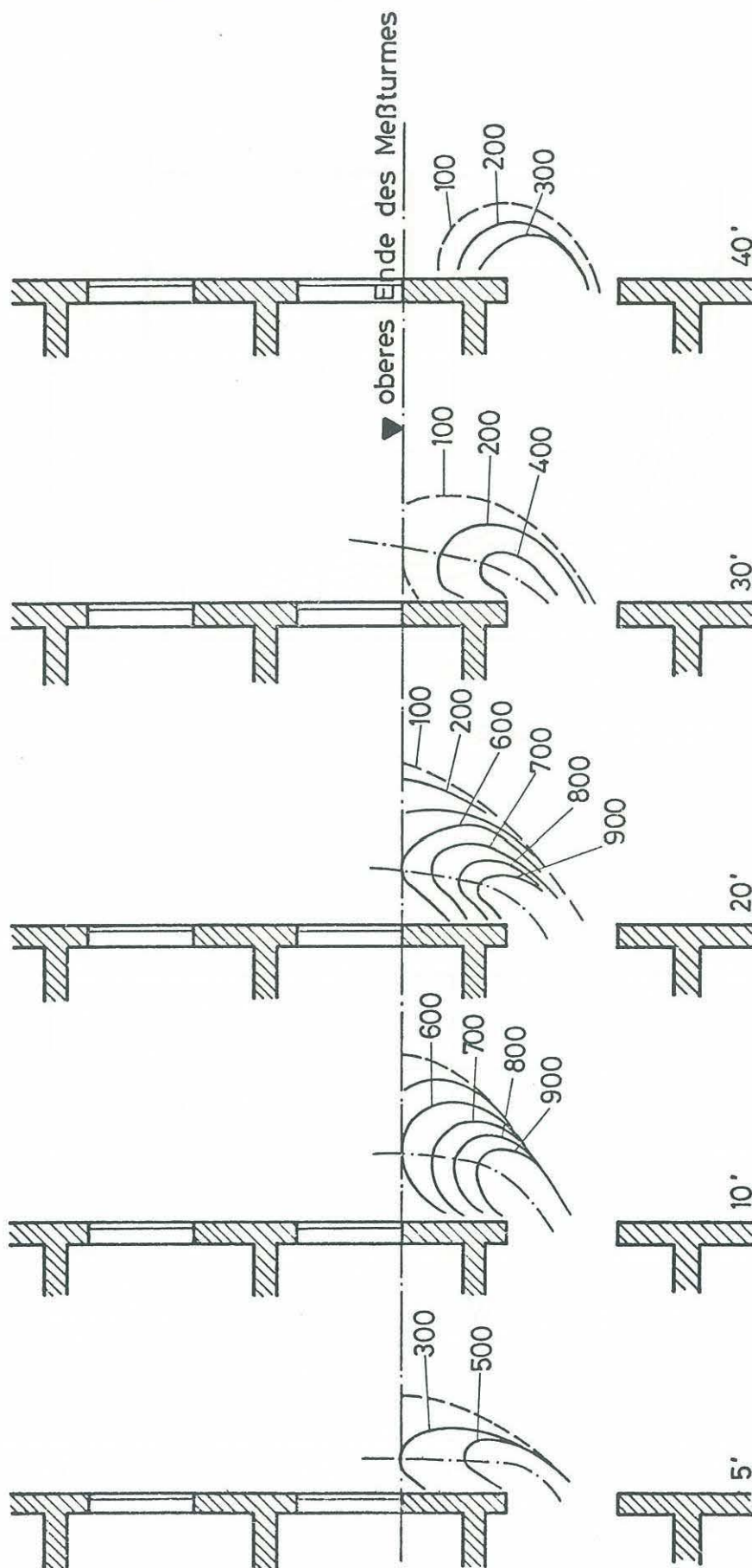


Temperaturen im Heißgasstrom (Ebene B)



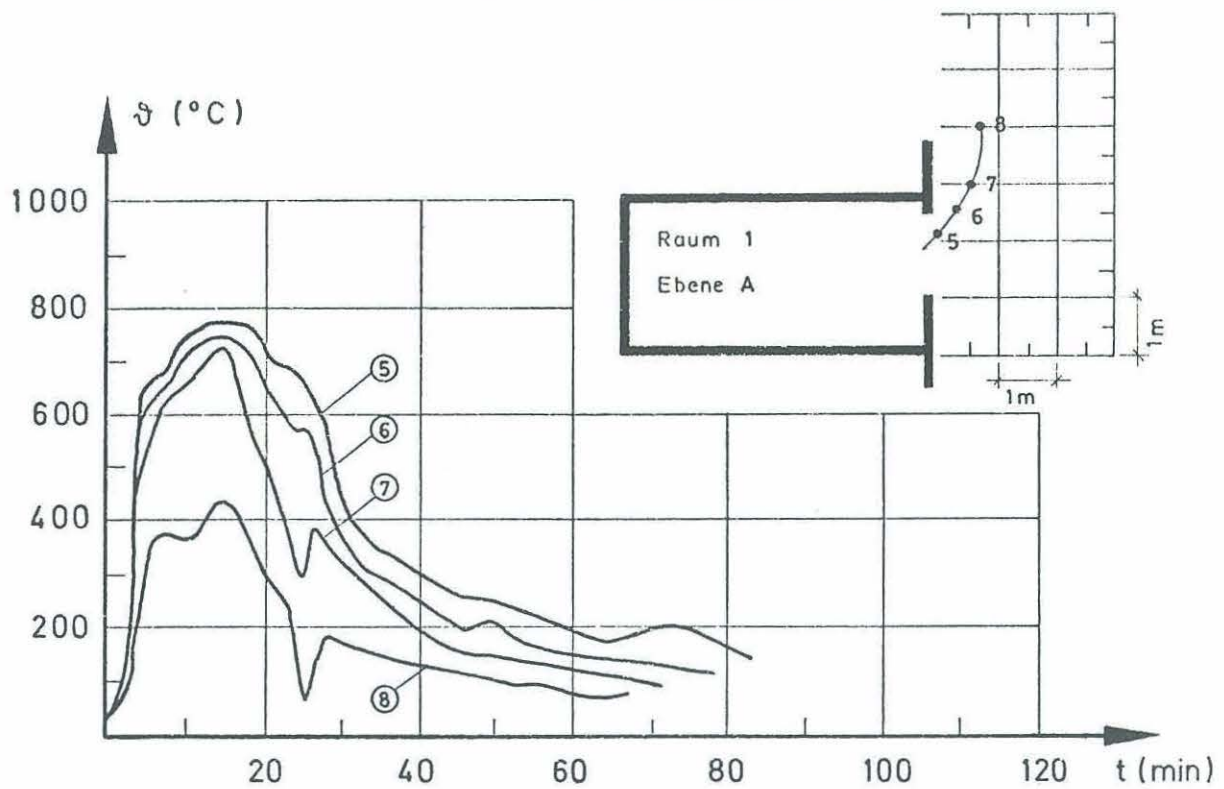
Windgeschwindigkeit und -richtung

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.2 Nr. 1

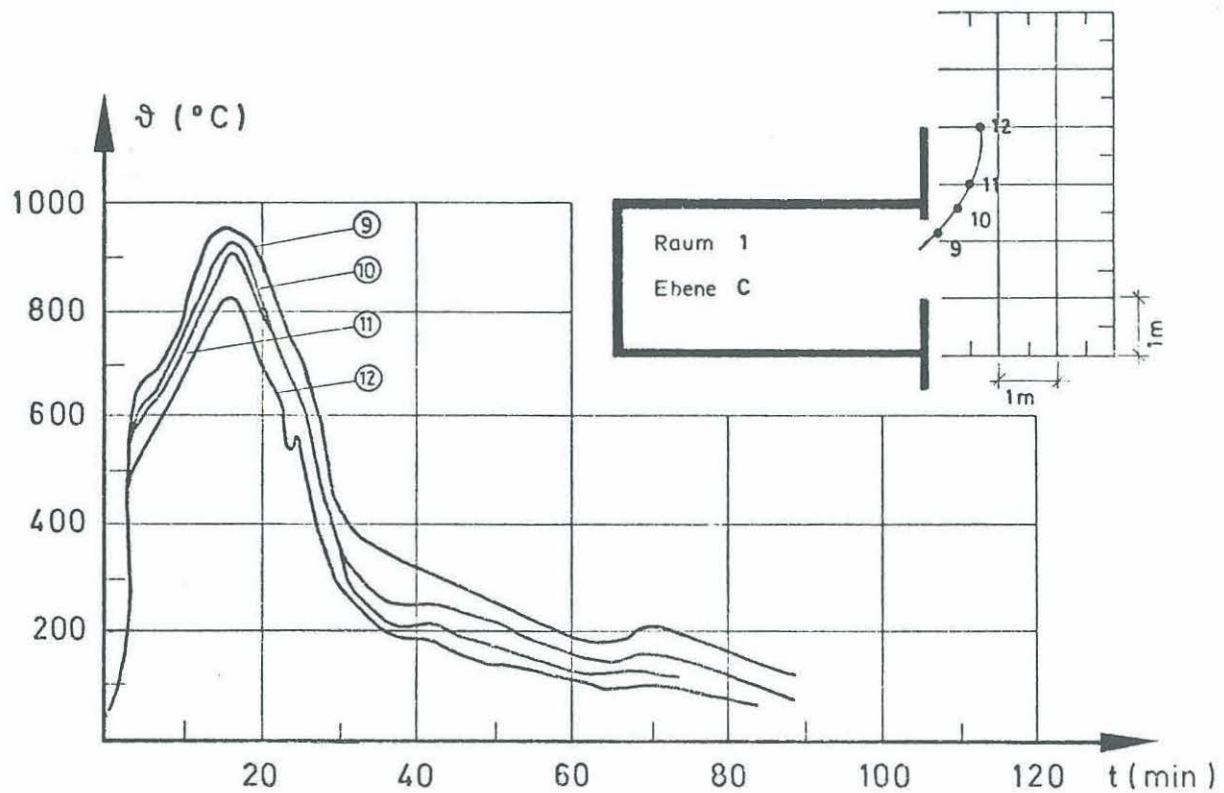


Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Ebene B)

Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.2 Nr. 2

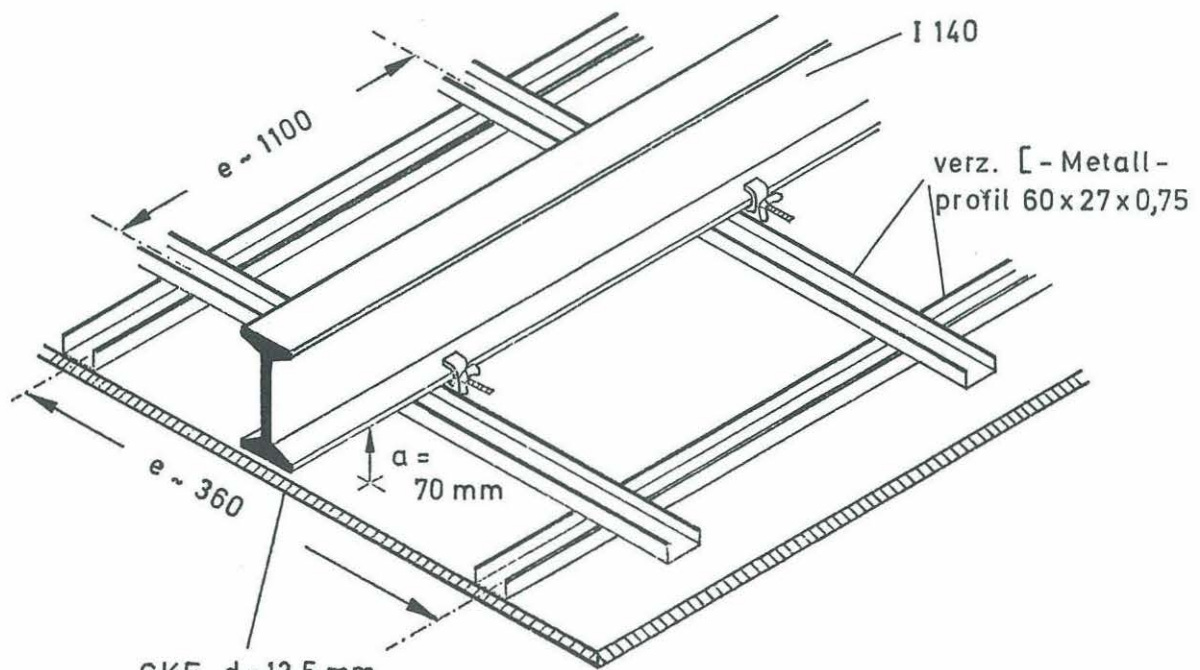
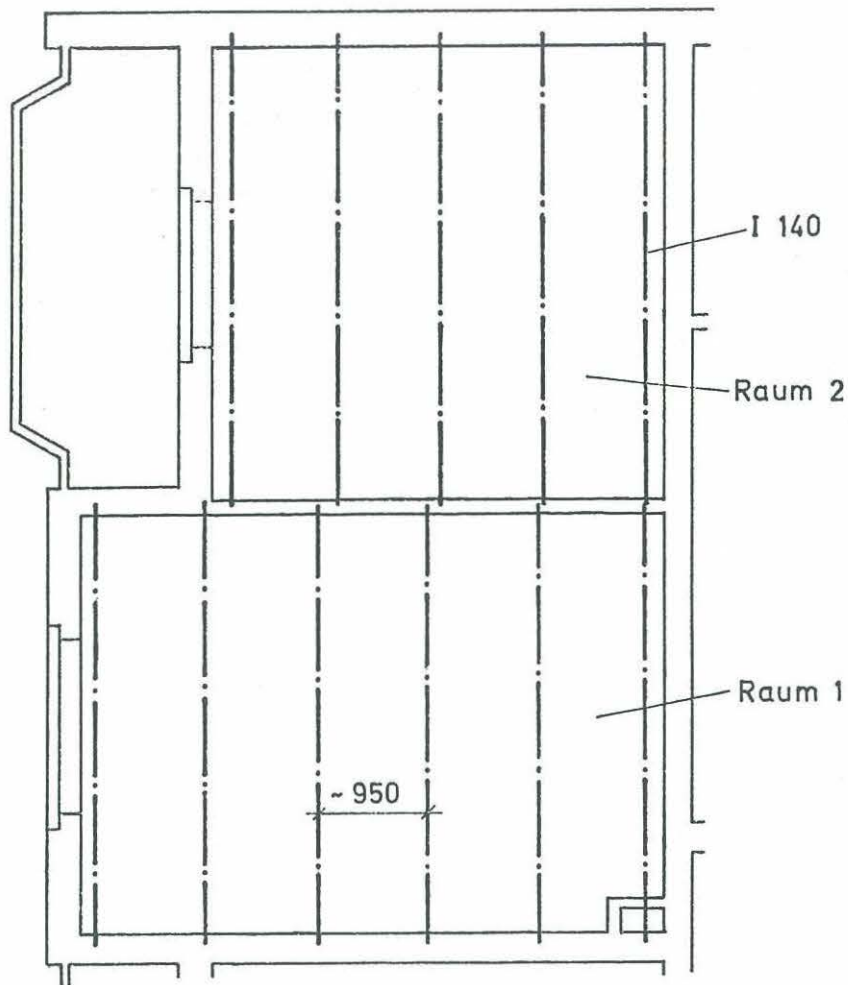


Temperaturen im Heißgasstrom (Ebene A)



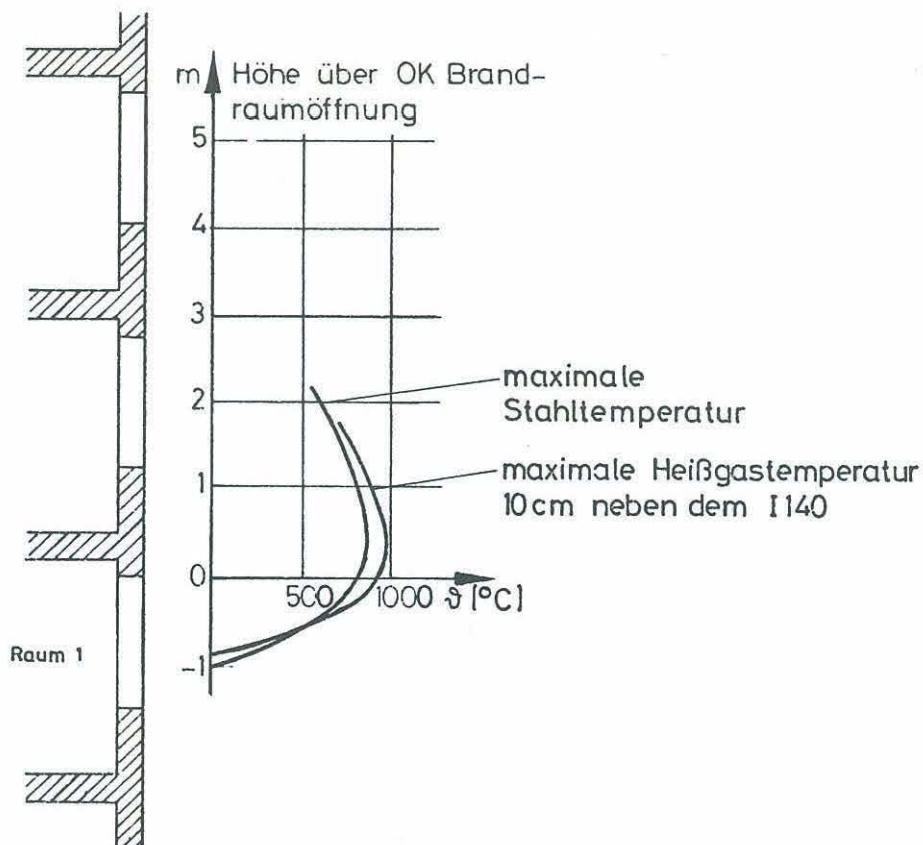
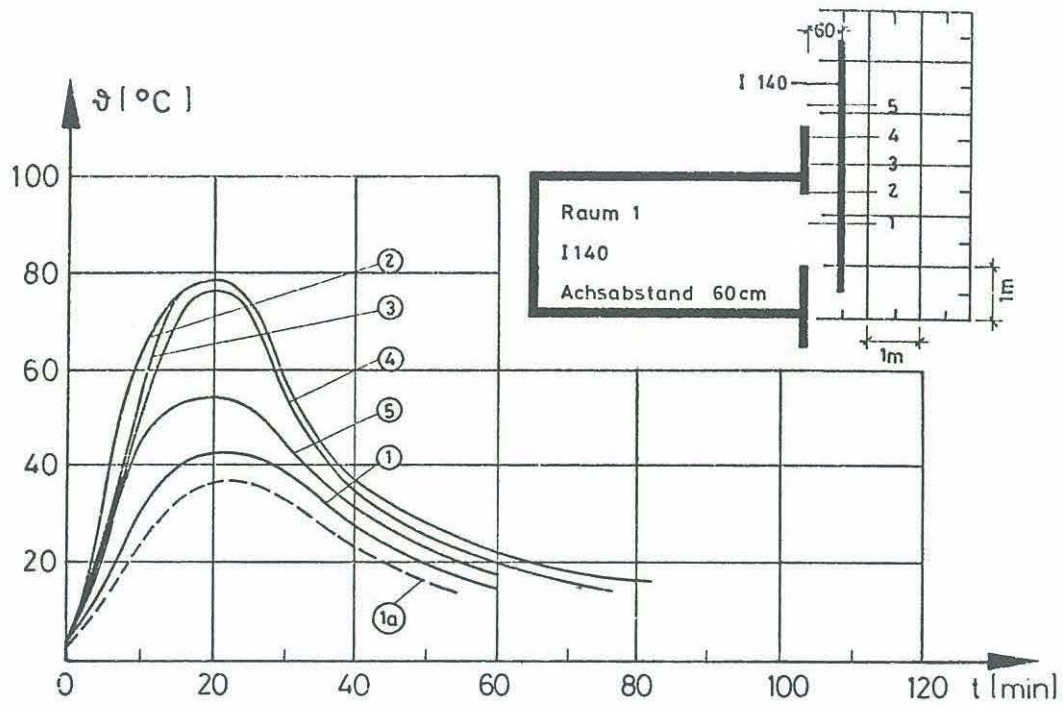
Temperaturen im Heißgasstrom (Ebene C)

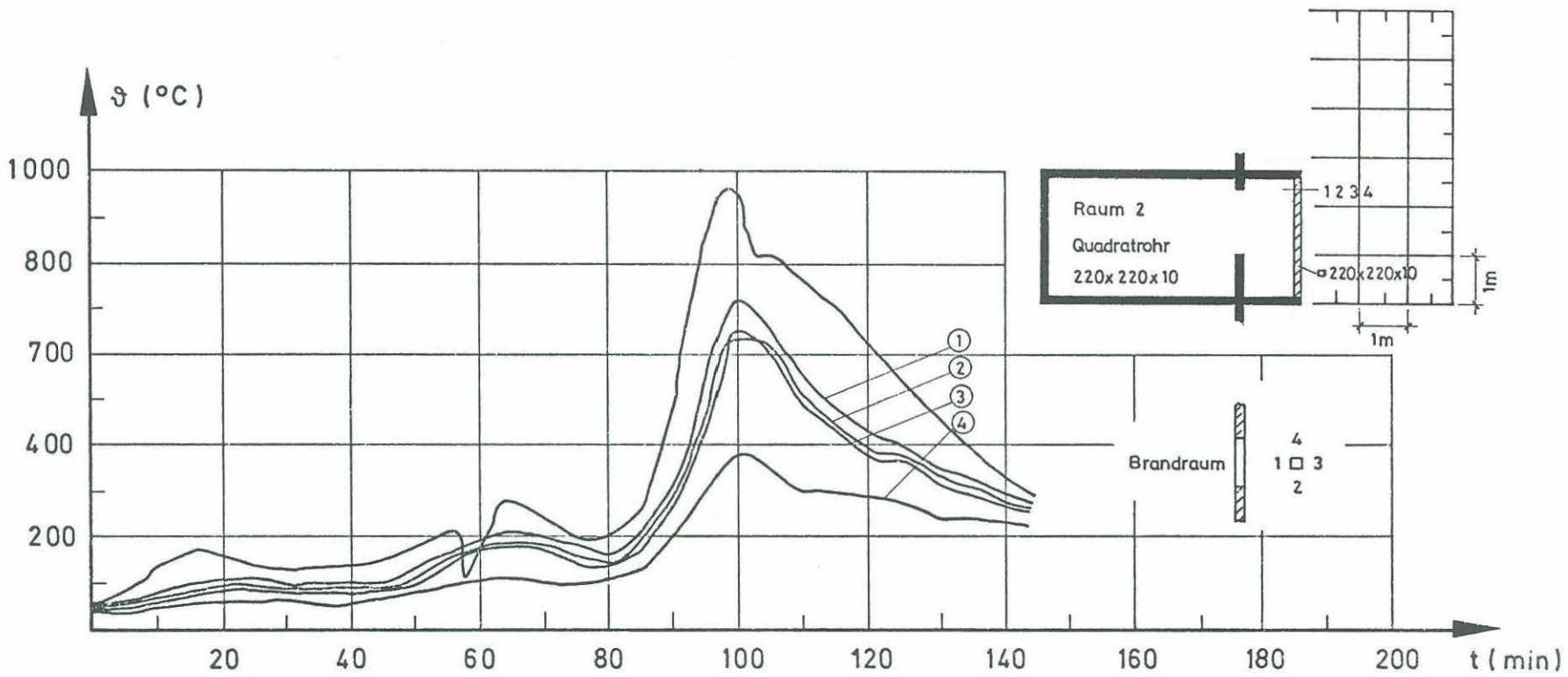
Anlage zum Versuch 2
Kap. 6.2 Nr. 3



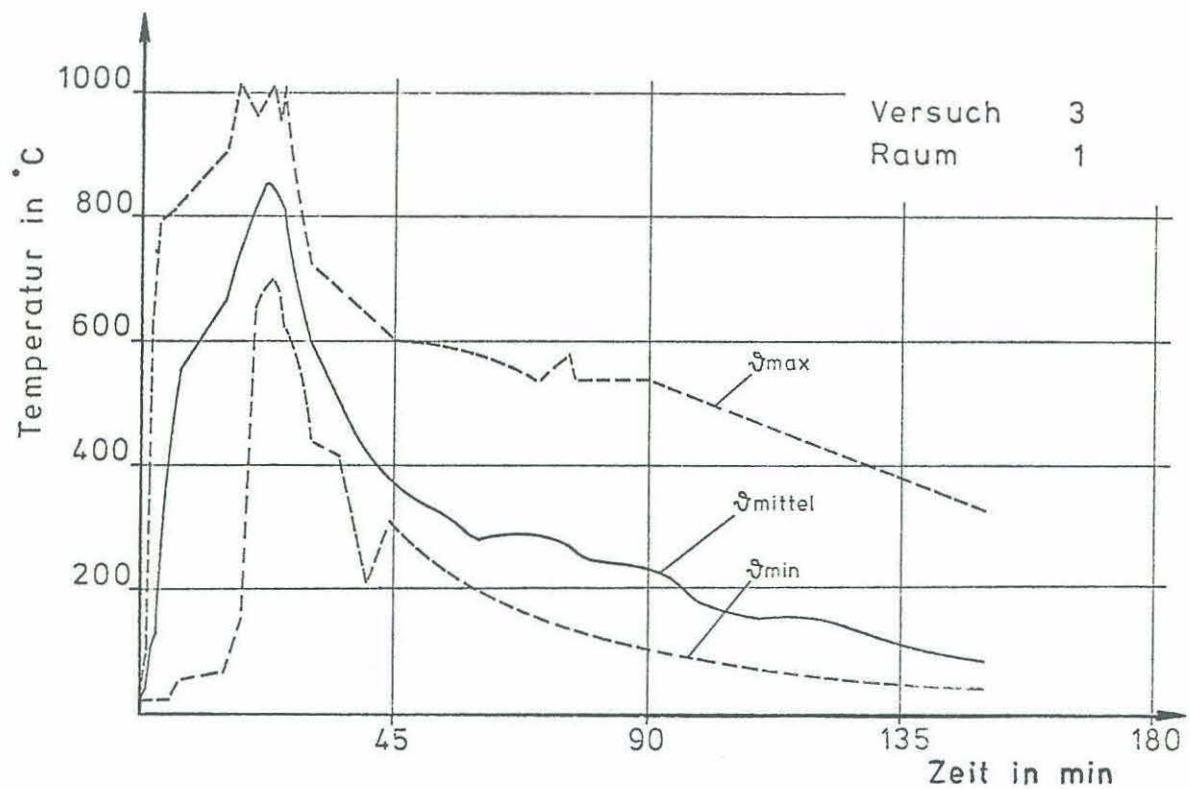
Unterdecke aus 12,5 mm dicken GKF-Platten an Metallschienen (Abhängtiefe $a = 70 \text{ mm}$)

Anlage zum Versuch 2
Kap. 7.3 Nr. 1

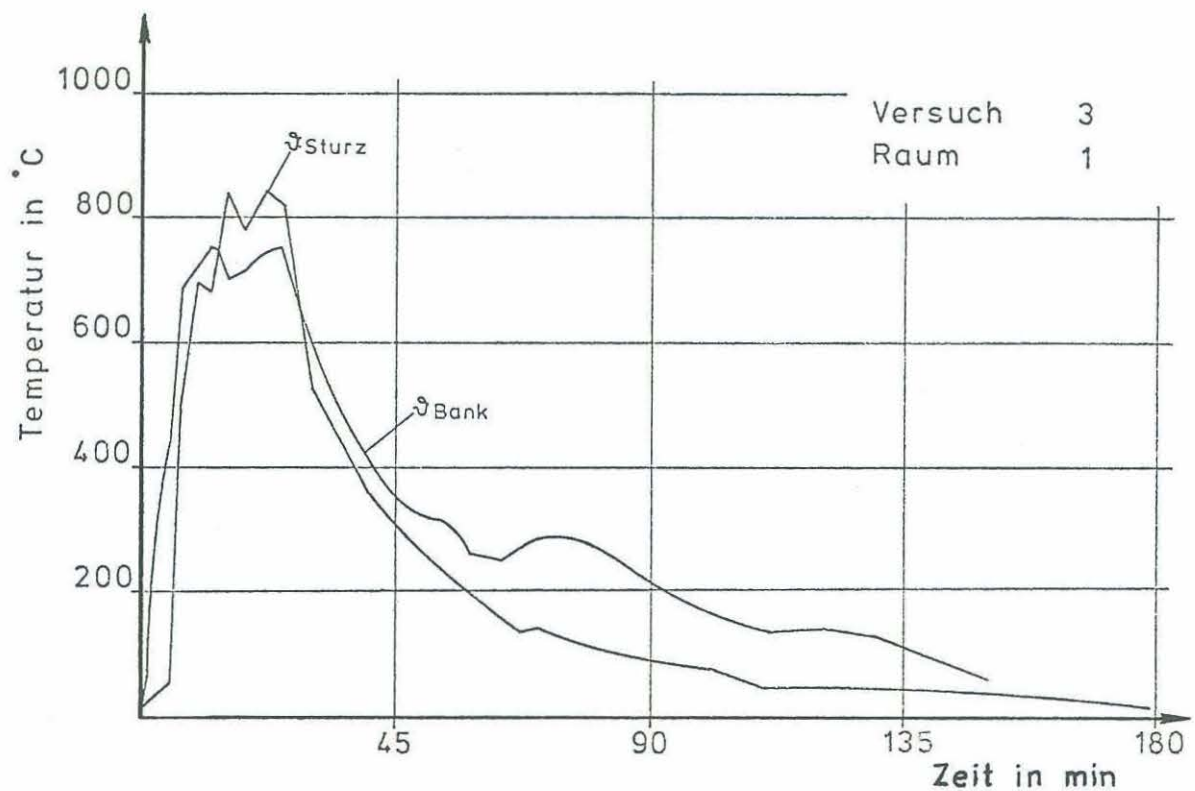




Temperaturentwicklung an der Quadratrohrstütze 220 × 220 × 10

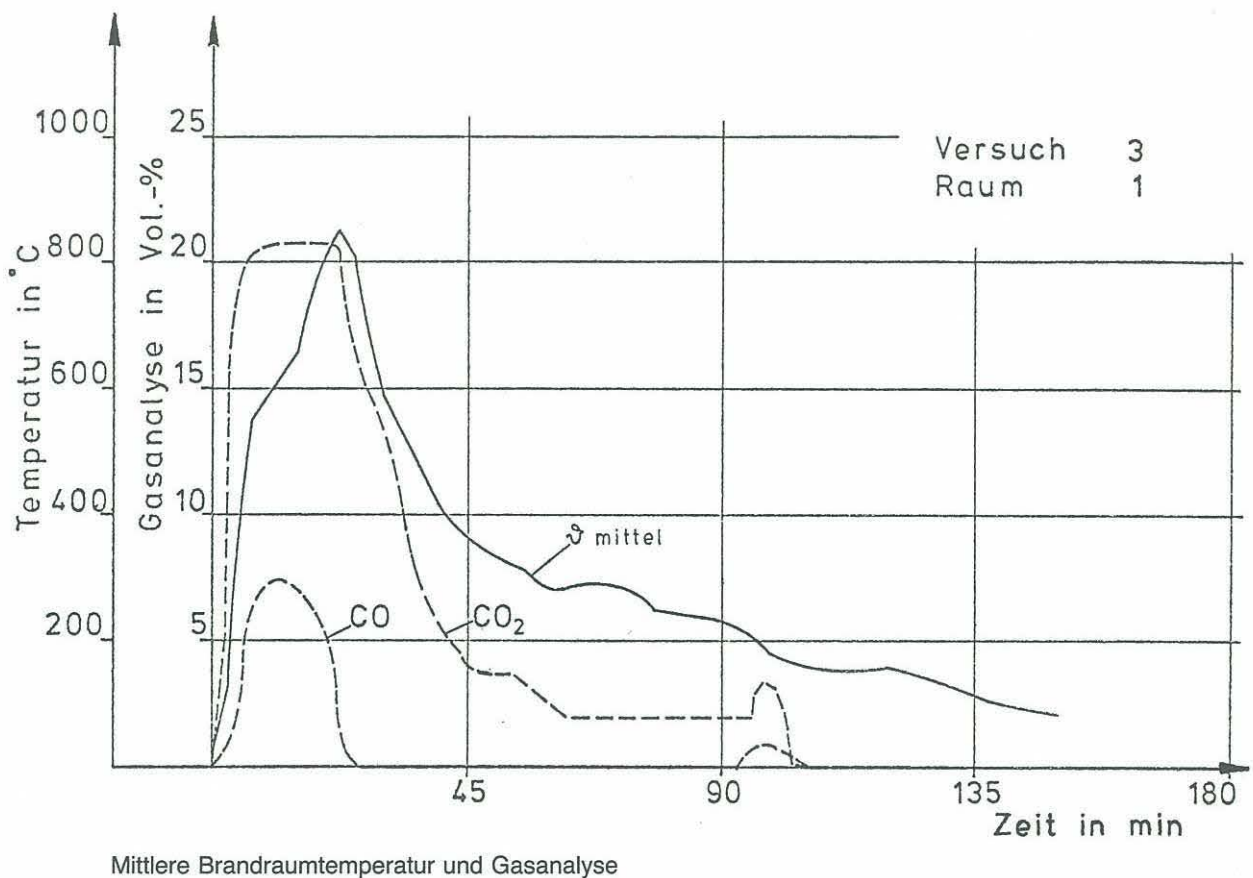
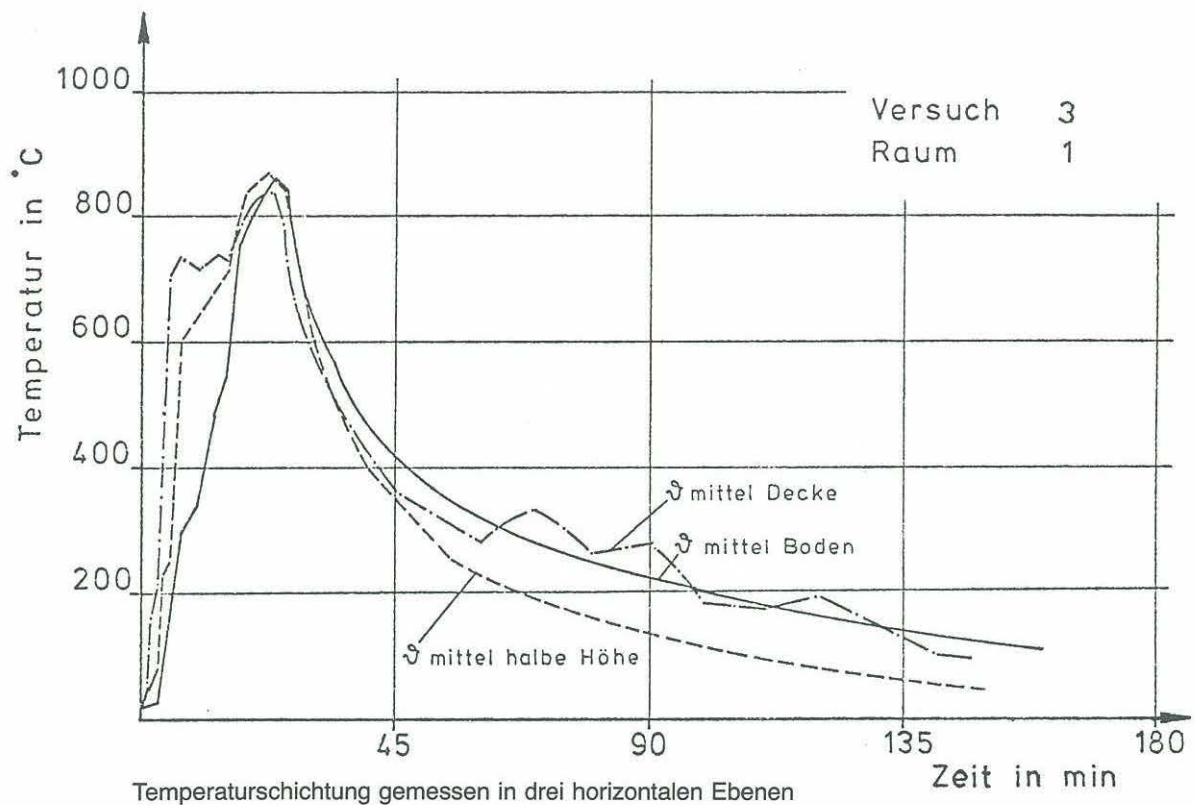


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

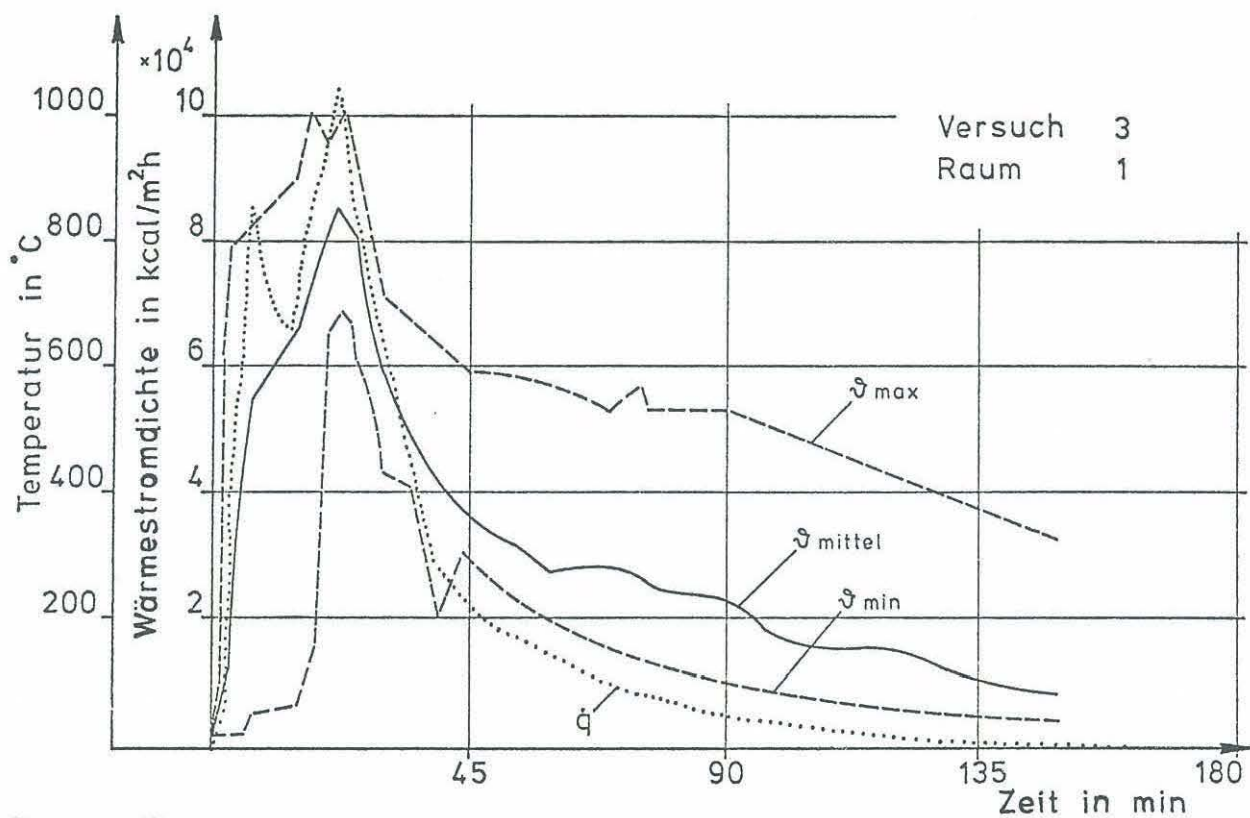


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2

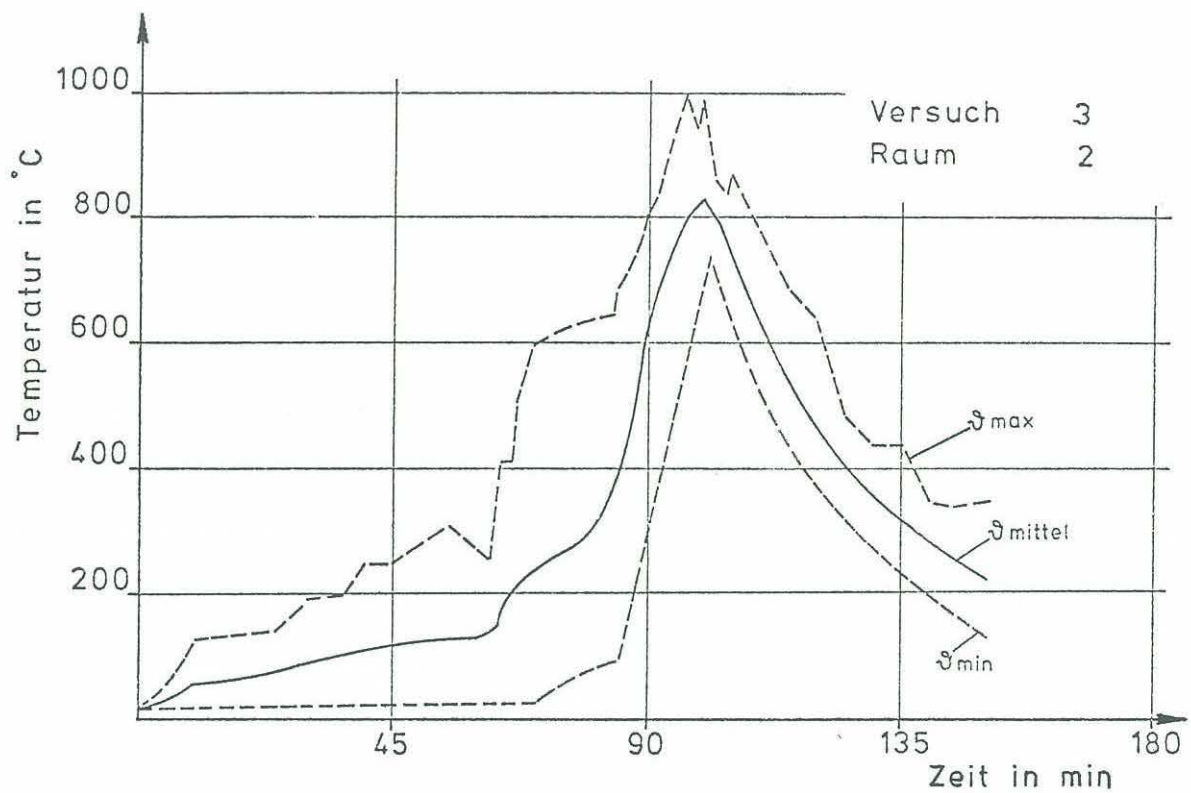


Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4

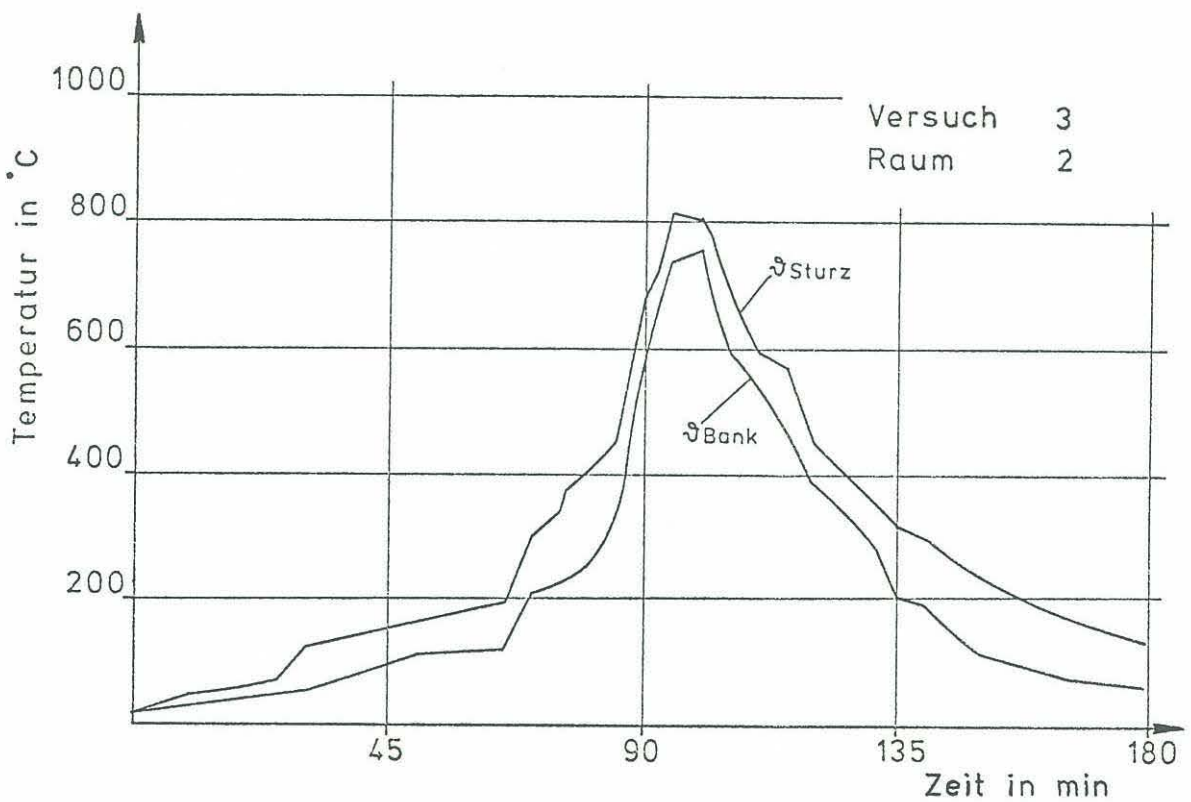


Temperaturstreibereich und Wärmestromdichte in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 5

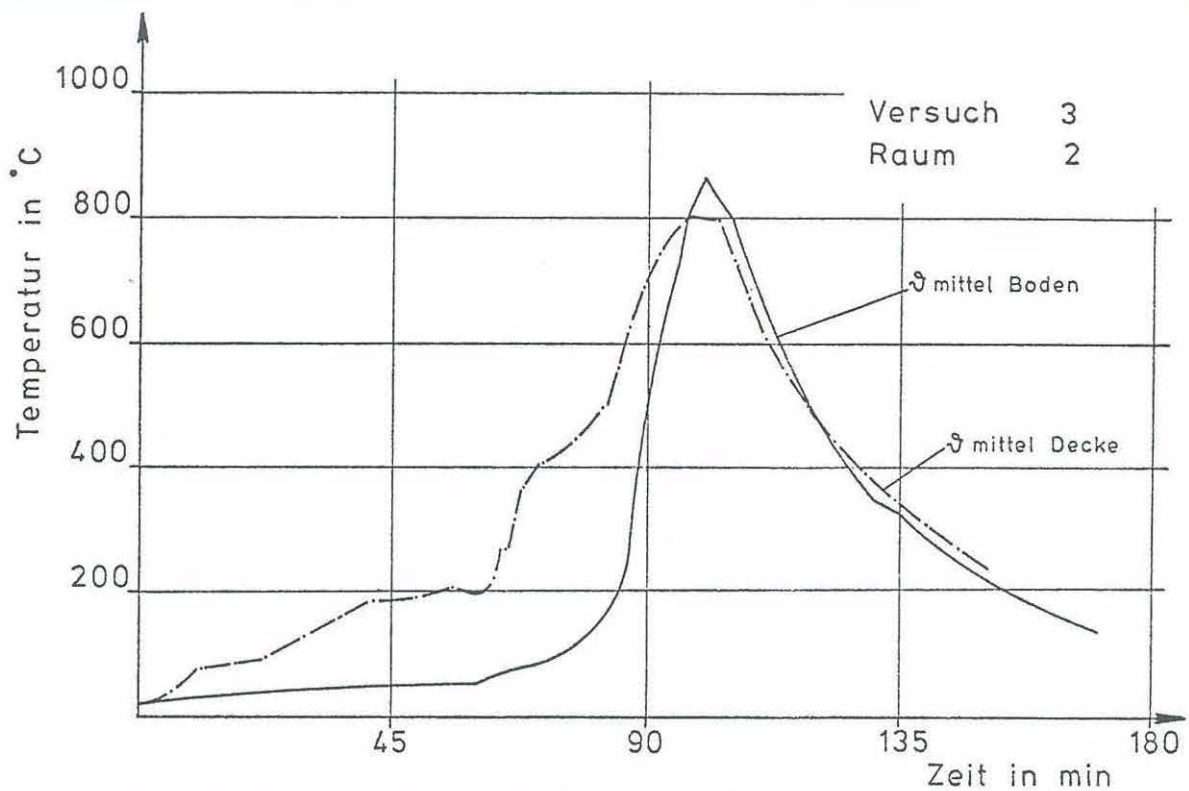


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

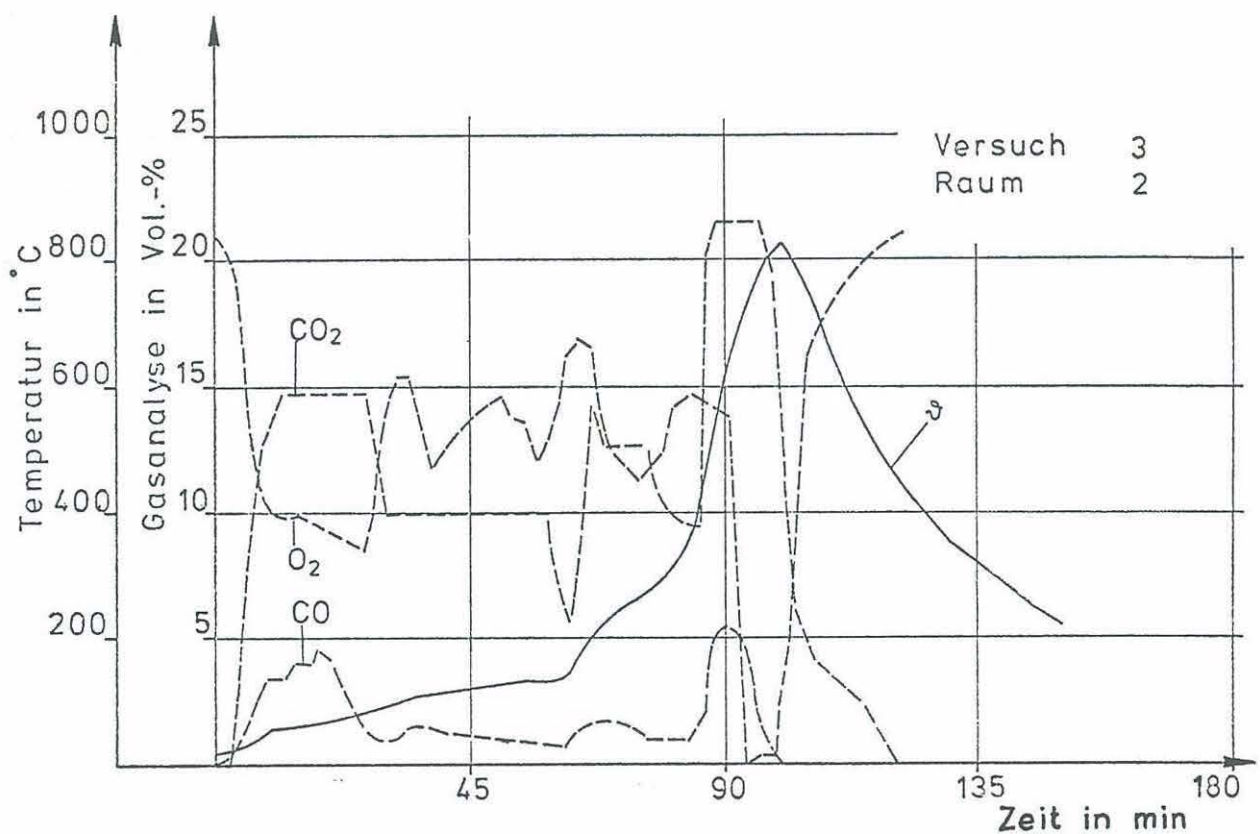


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 6
Kap. 6.1 Nr. 7

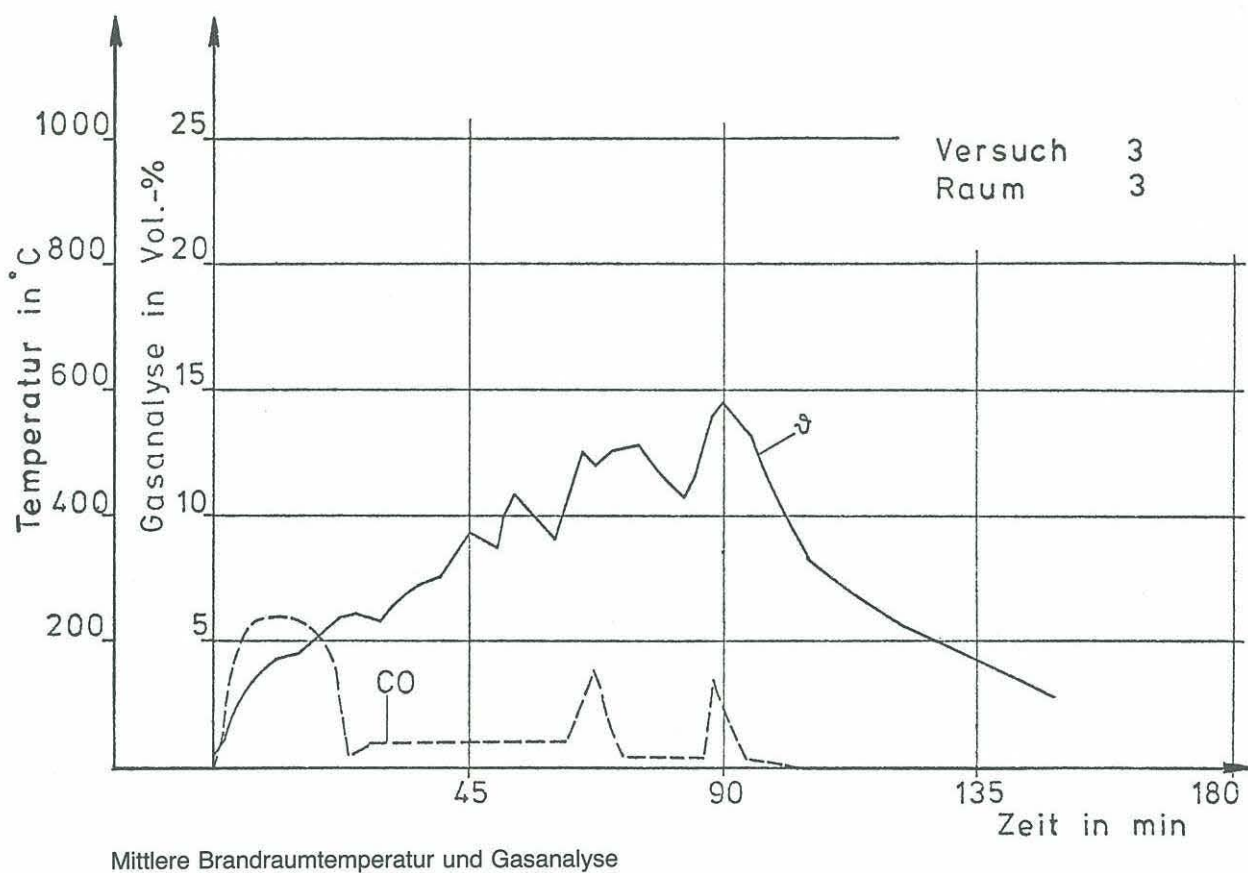
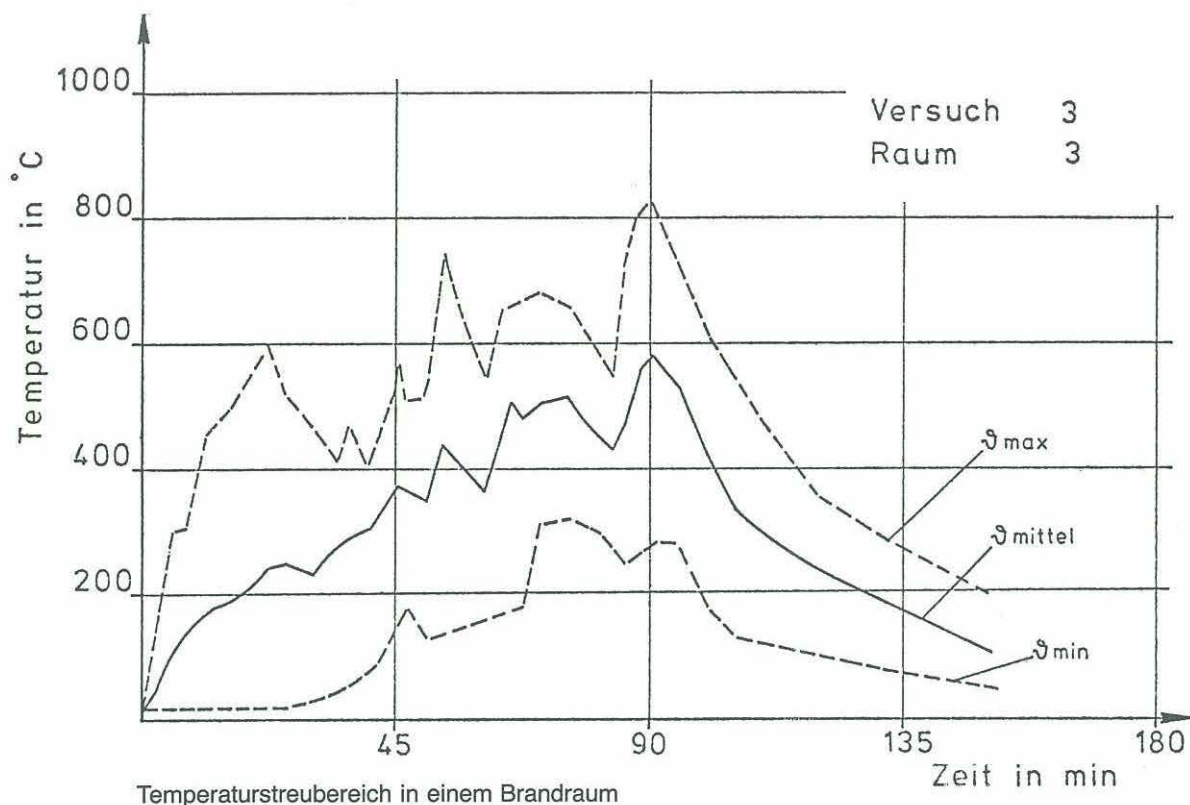


Temperaturschichtung gemessen in zwei horizontalen Ebenen

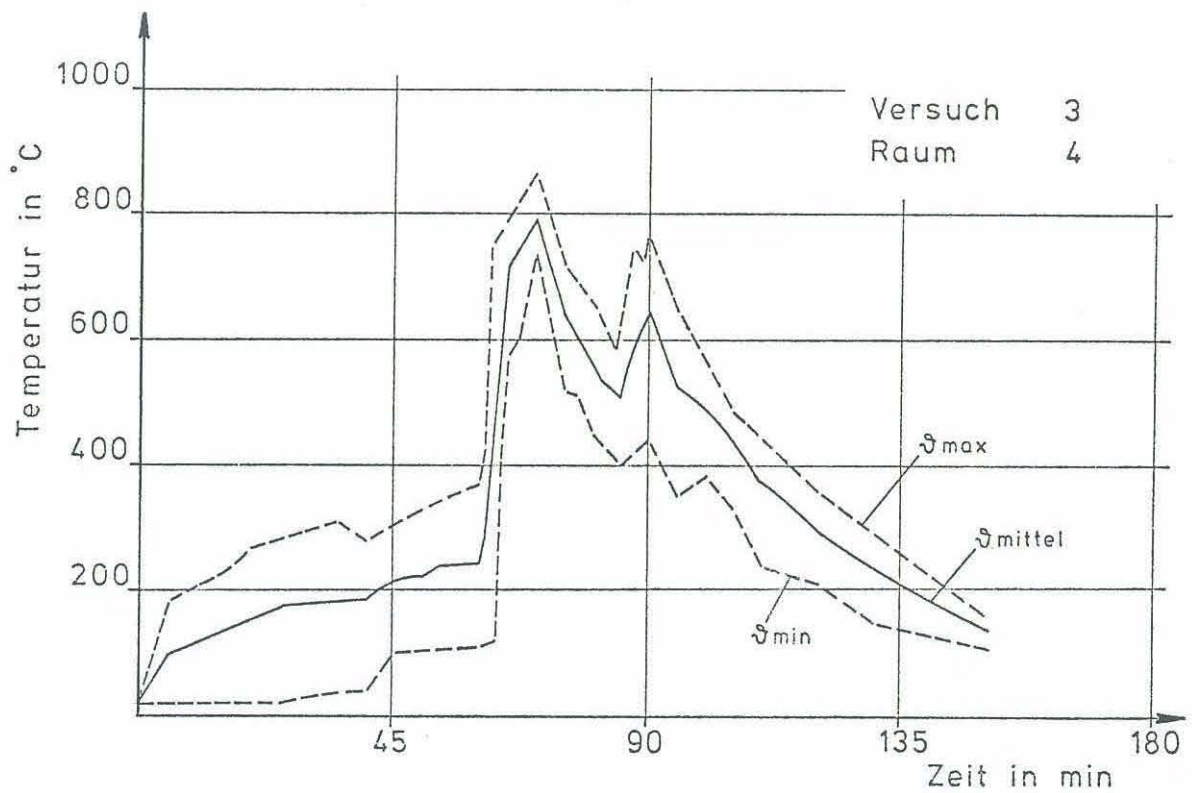


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

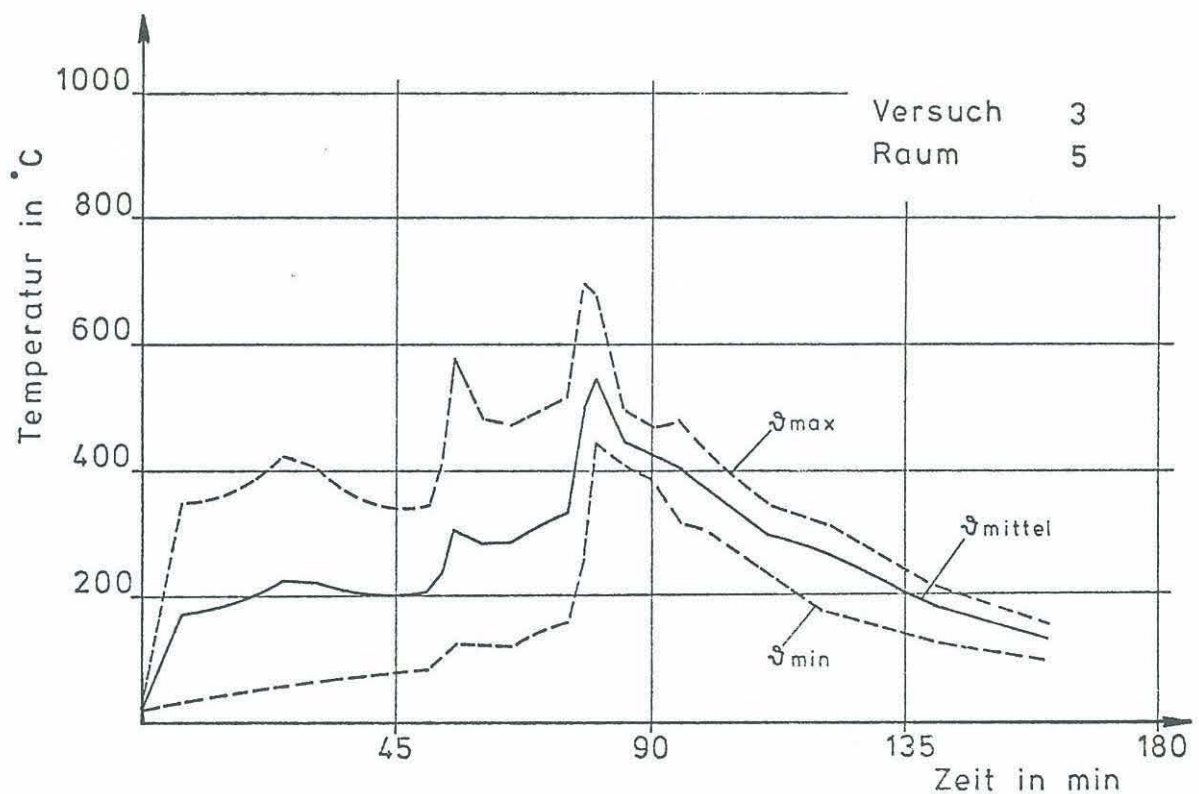
Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 8
Kap. 6.1 Nr. 9



Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 10
Kap. 6.1 Nr. 11

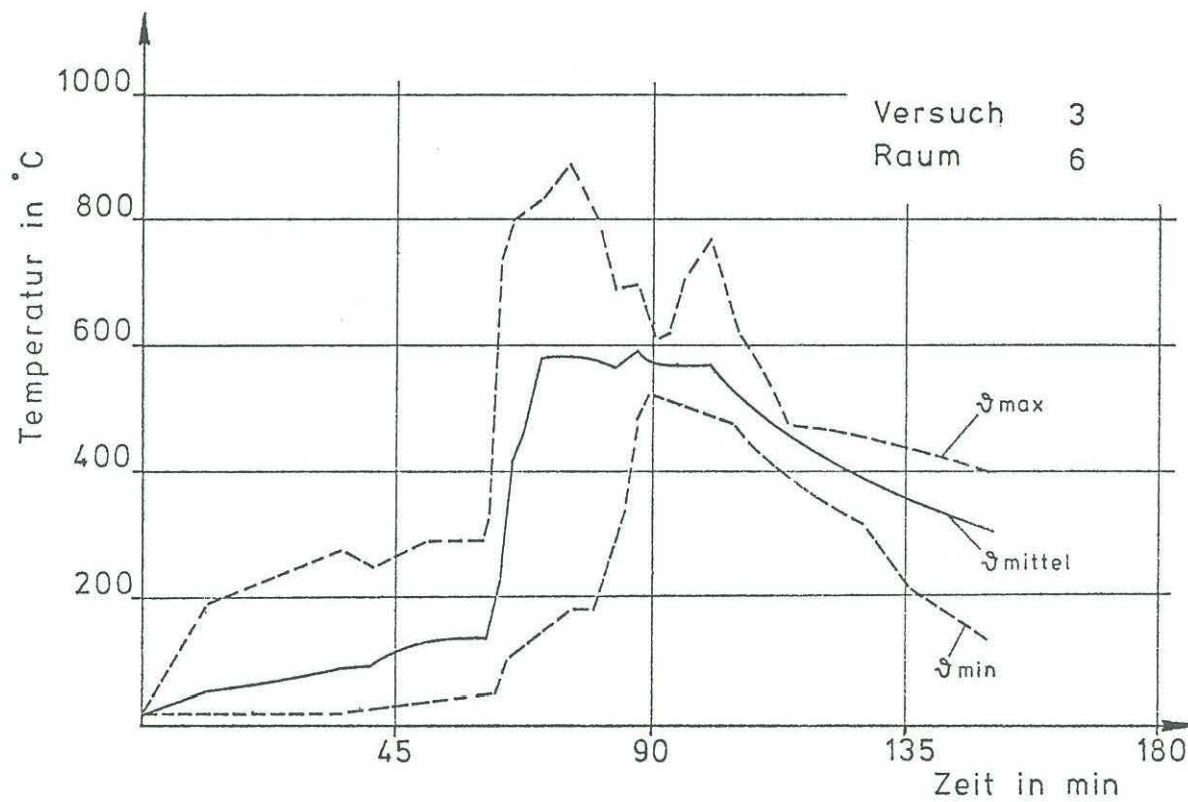


Temperaturstreibereich in einem Brandraum



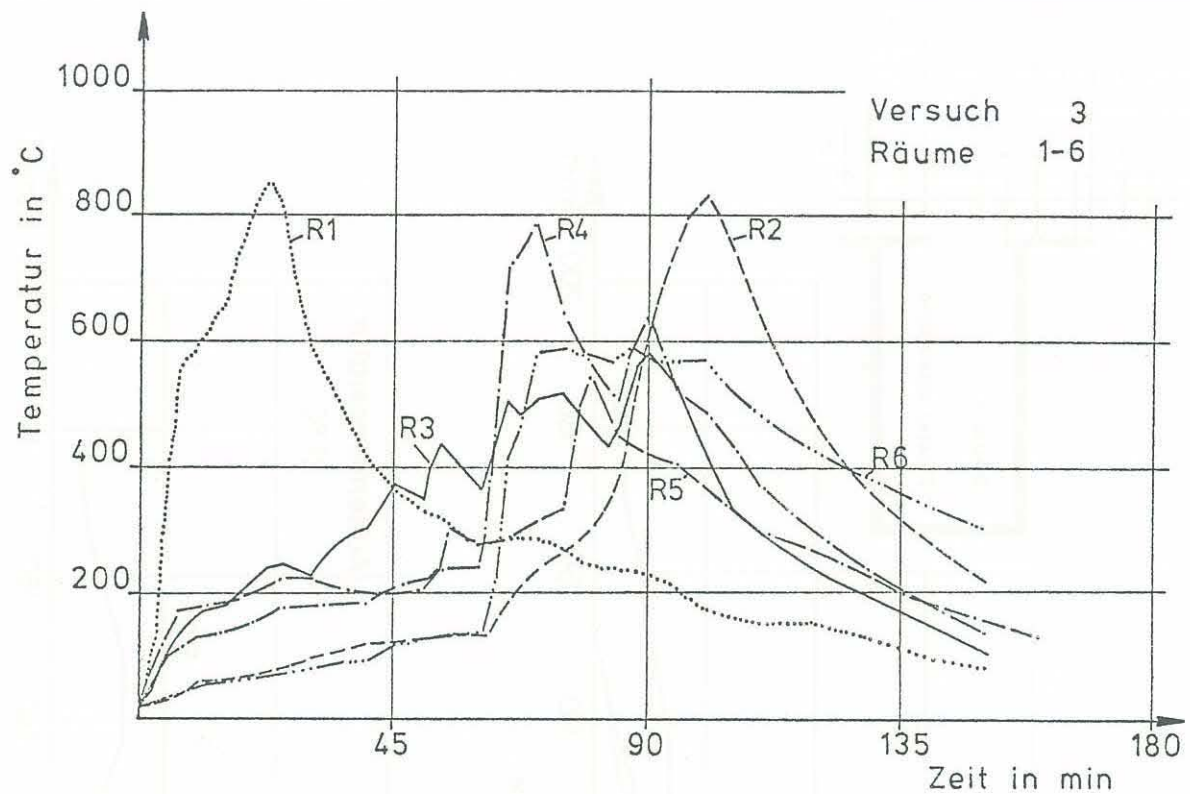
Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 12
Kap. 6.1 Nr. 13

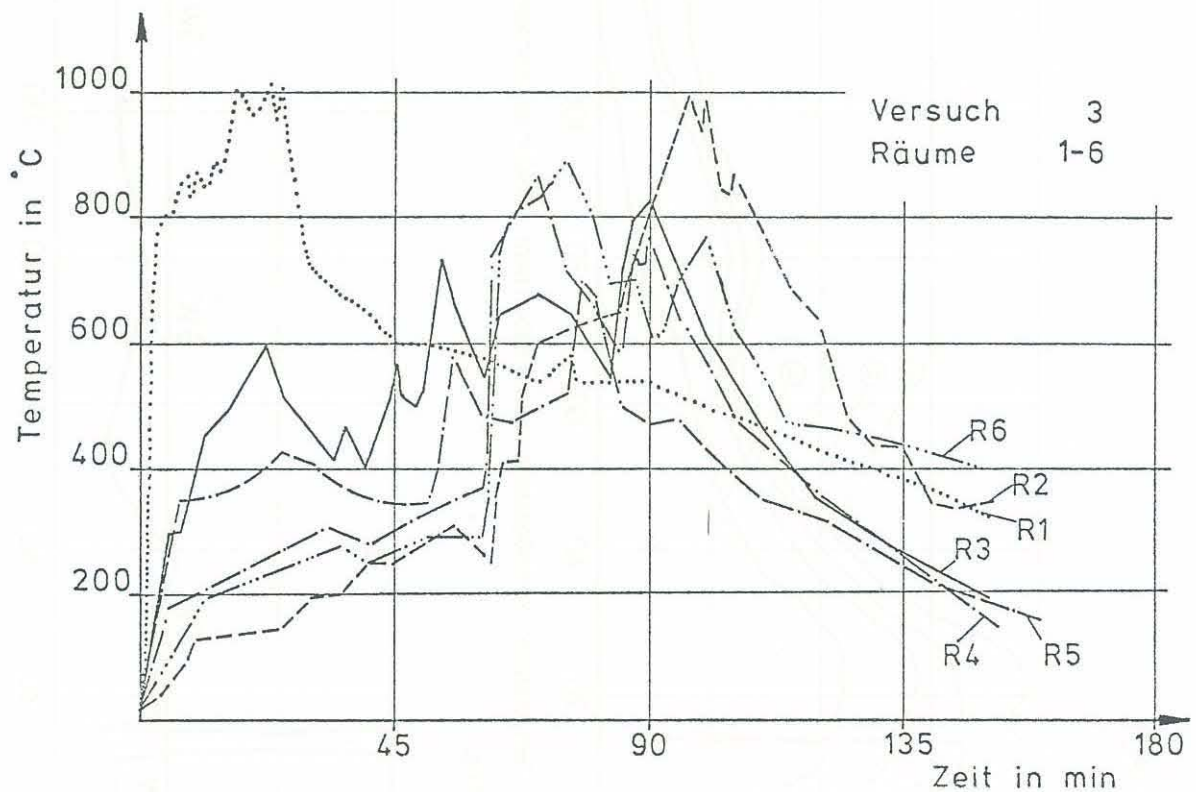


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 14

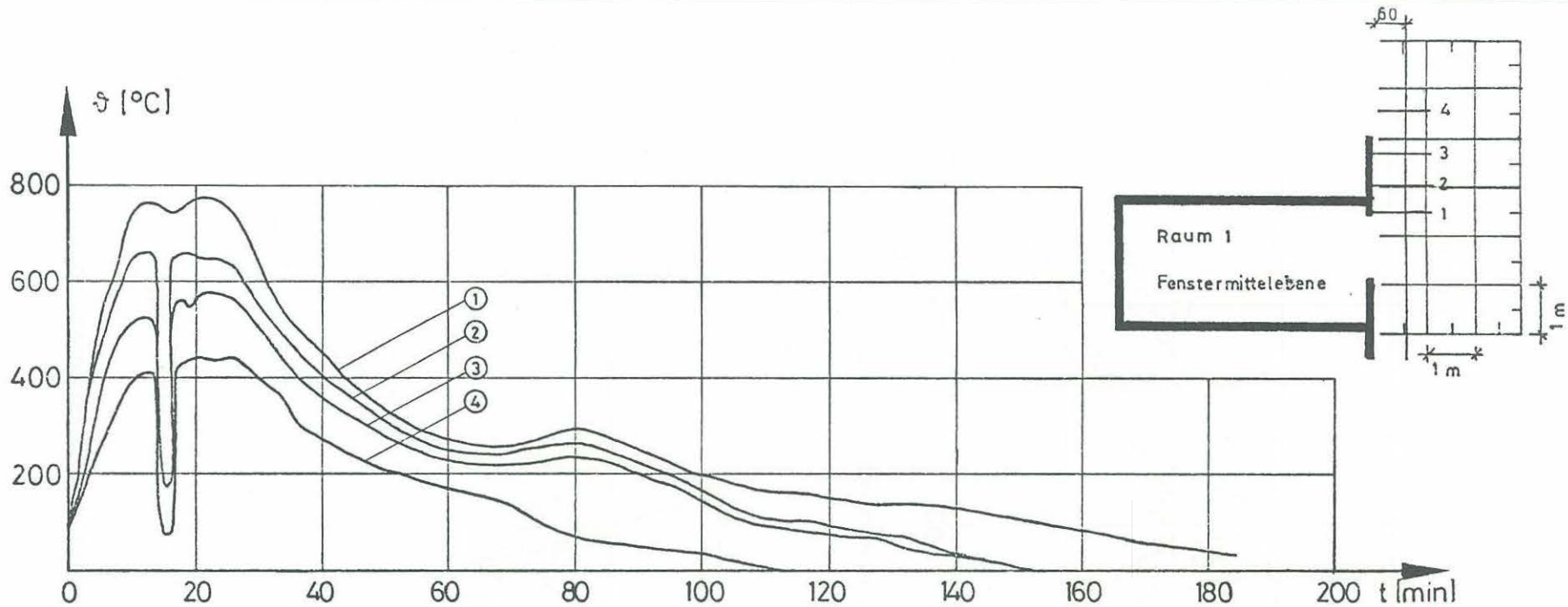


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

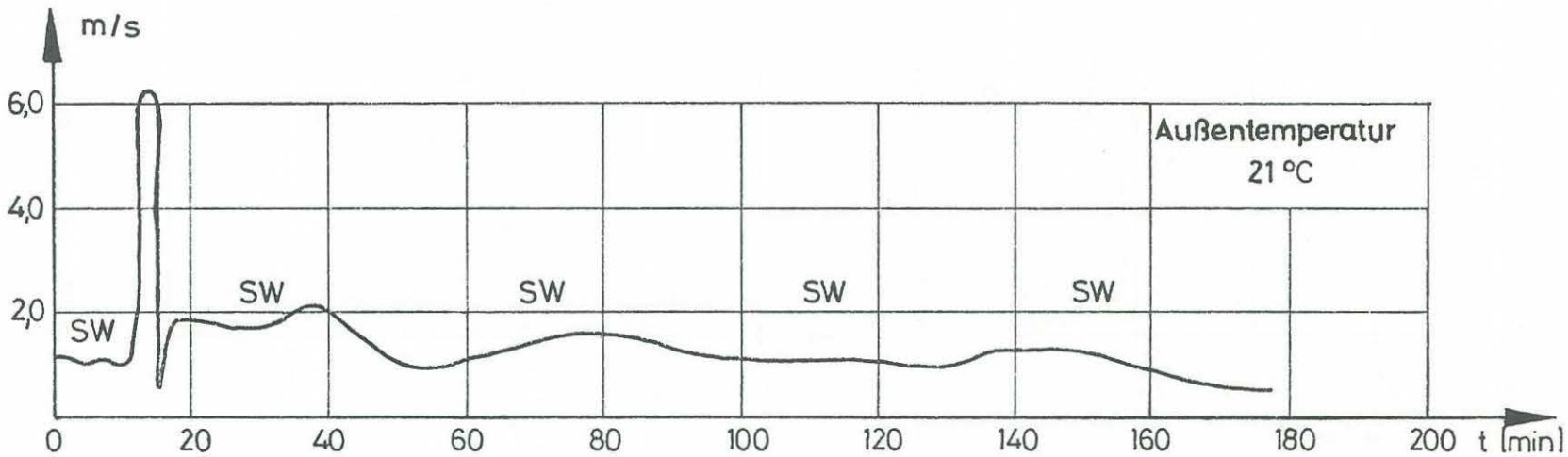


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (maximale Brandraumtemperaturen)

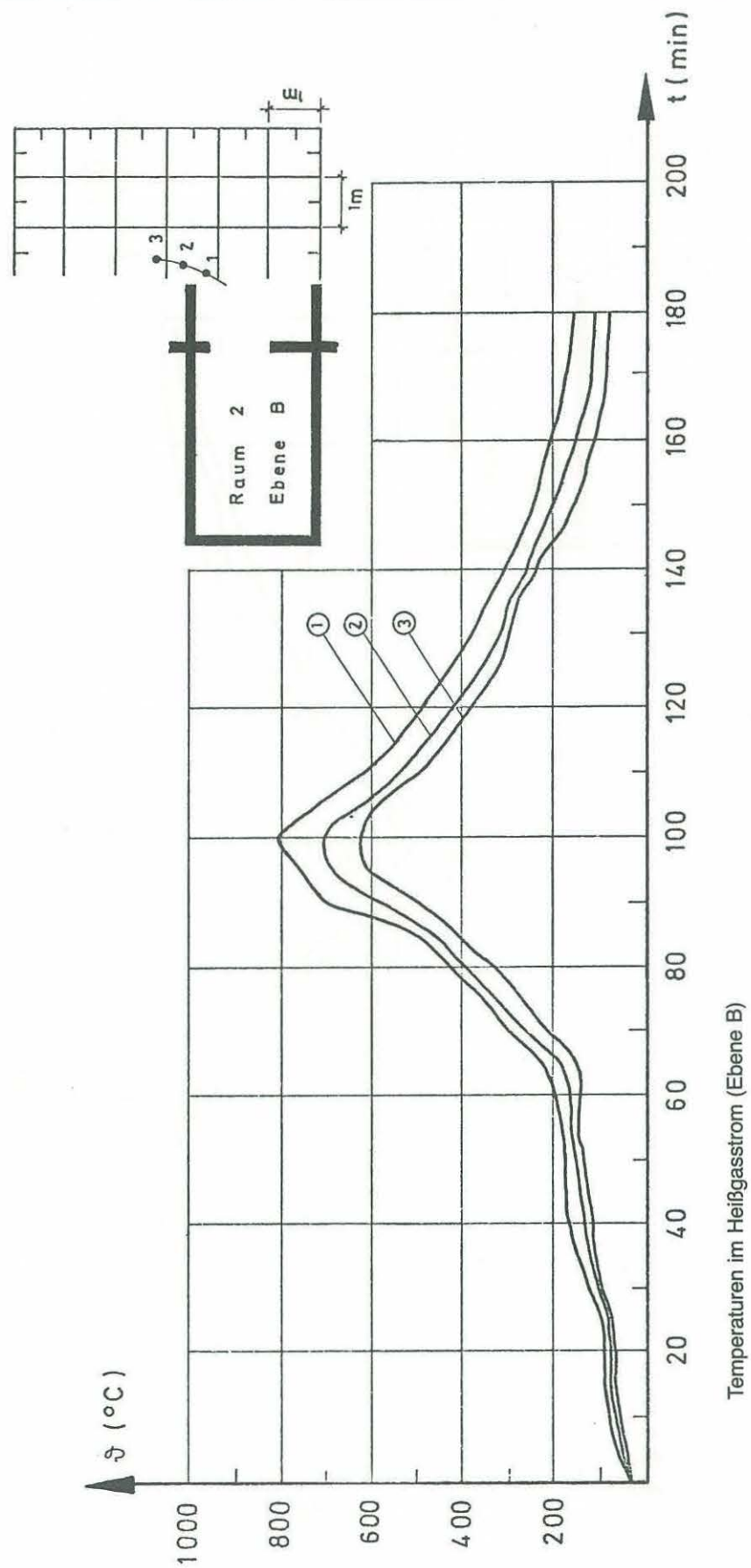
Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.1 Nr. 15
Kap. 6.1 Nr. 16



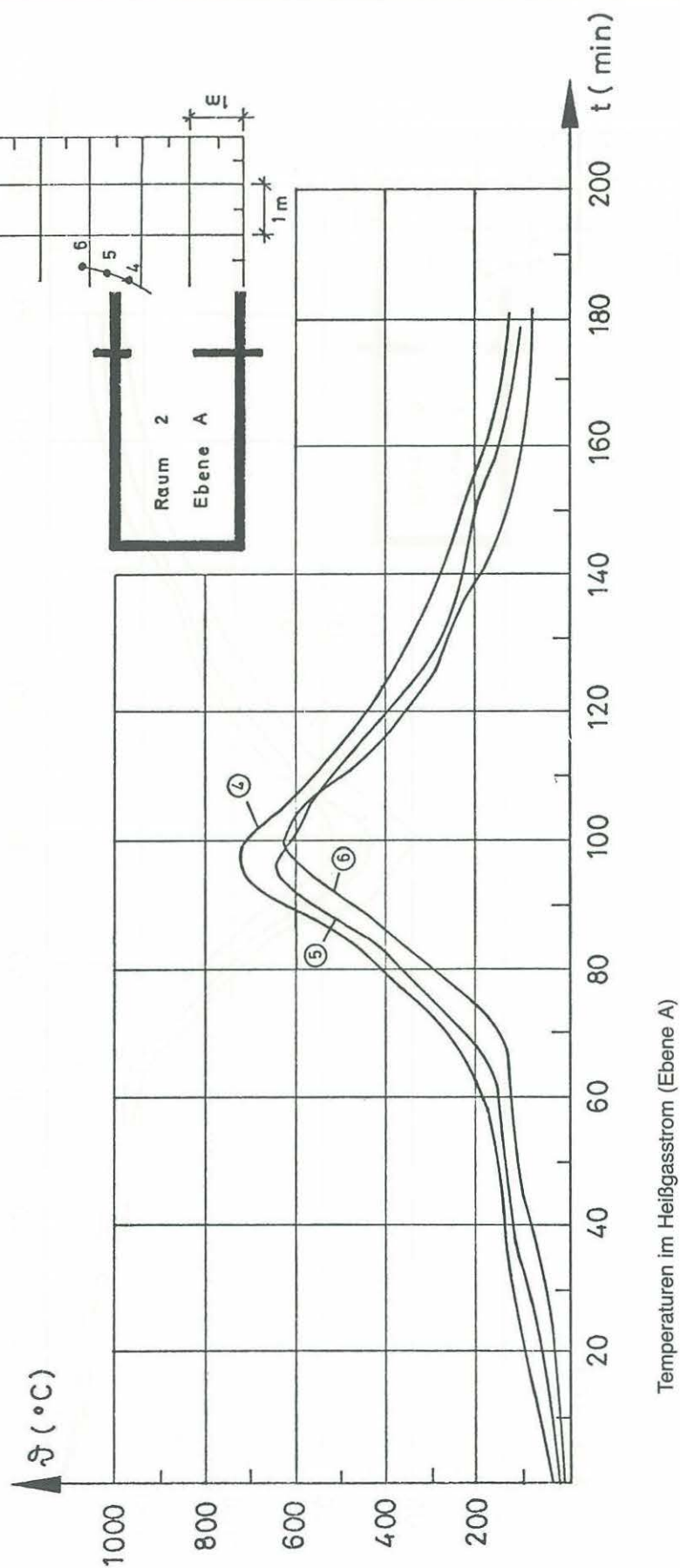
Temperaturen im Heißgasstrom 10 cm neben dem I 140 in der Fenstermittelebene



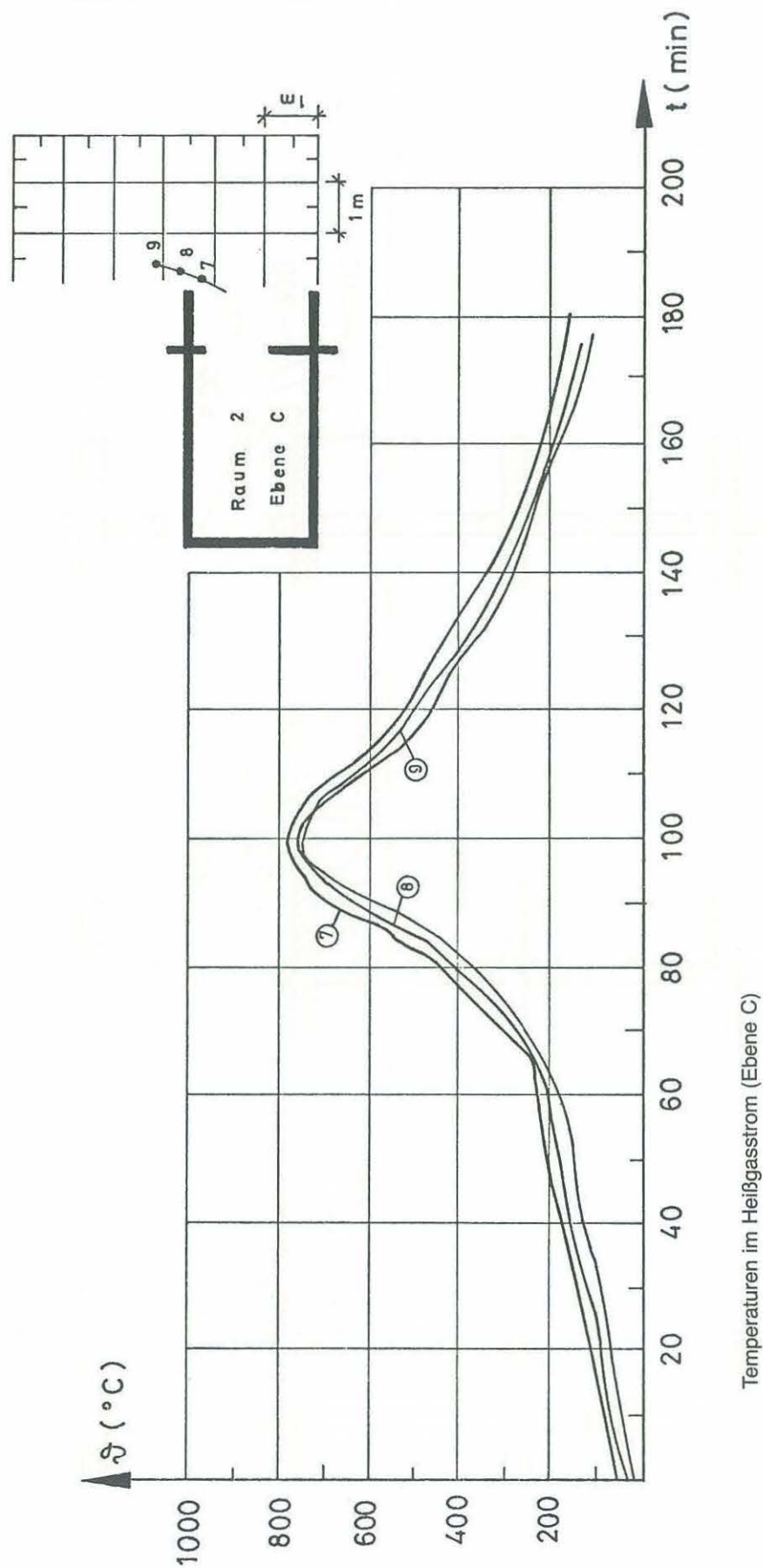
Windgeschwindigkeit und -richtung



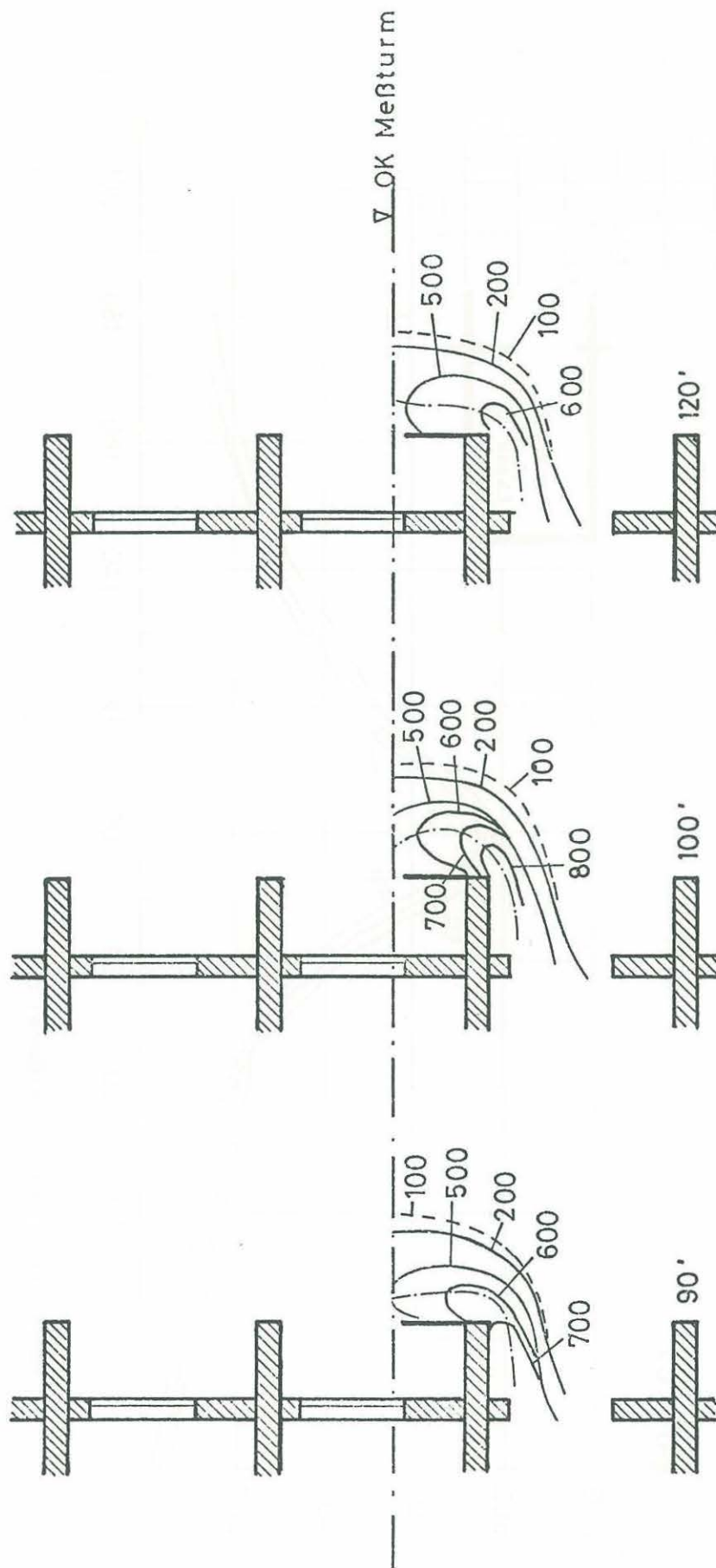
Anlage zum Versuch 3
 Kap. 6.2 Nr. 2



Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.2 Nr. 3

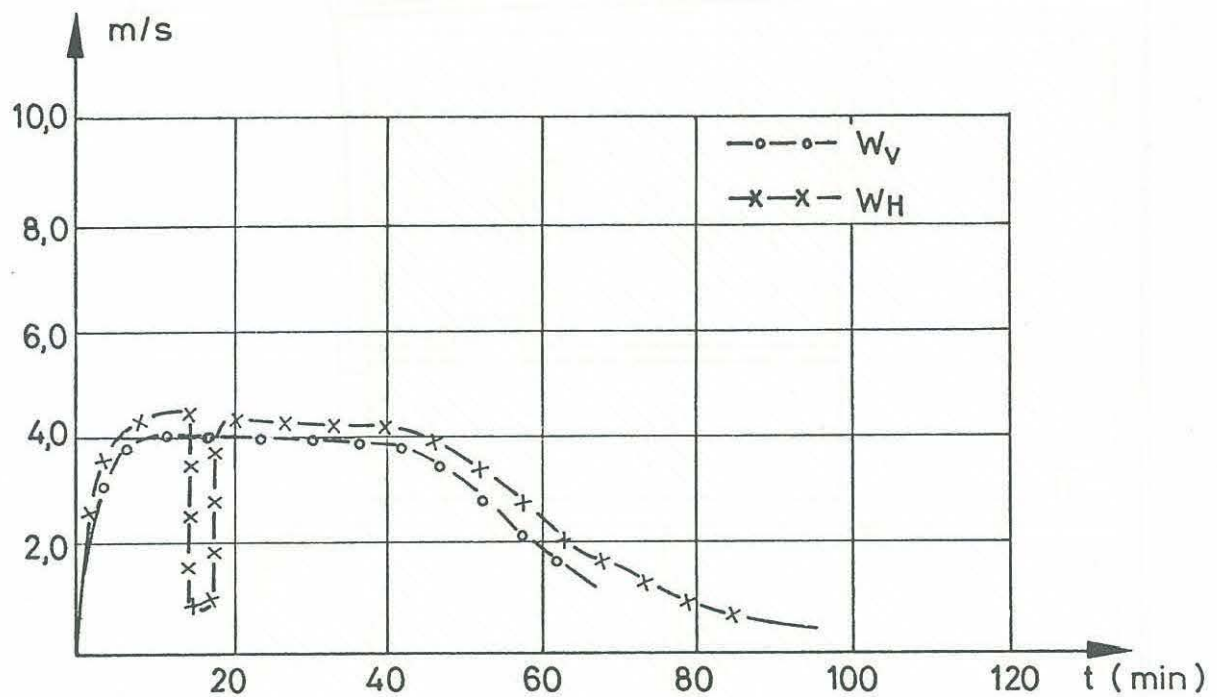


Anlage zum Versuch 3
 Kap. 6.2 Nr. 4



Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Ebene B)

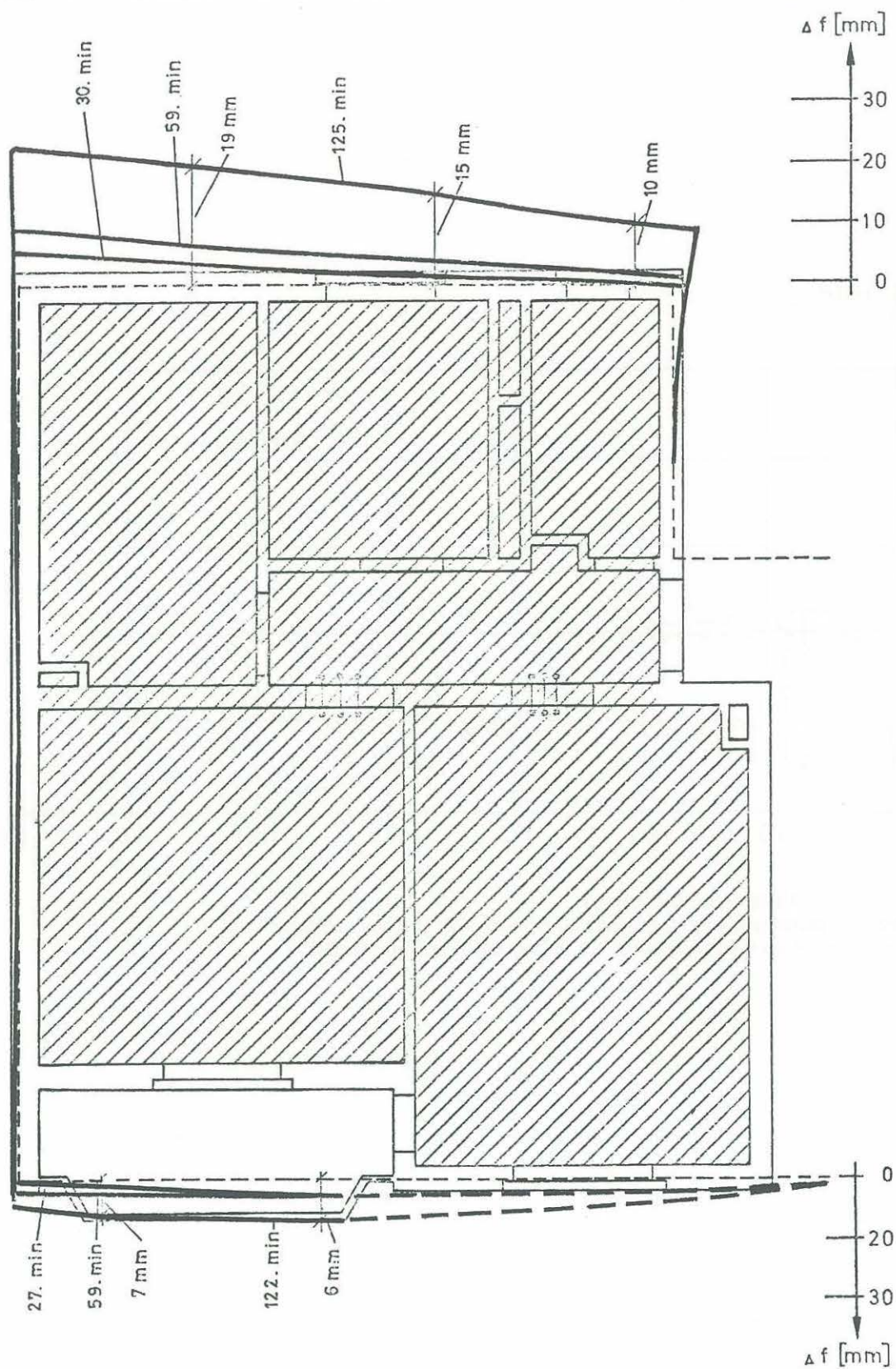
Anlage zum Versuch 3
Kap. 6.2 Nr. 5



Verlauf der Heißgasgeschwindigkeit

W_H = horizontale Geschwindigkeit 20 cm unter OK Brandraumfenster

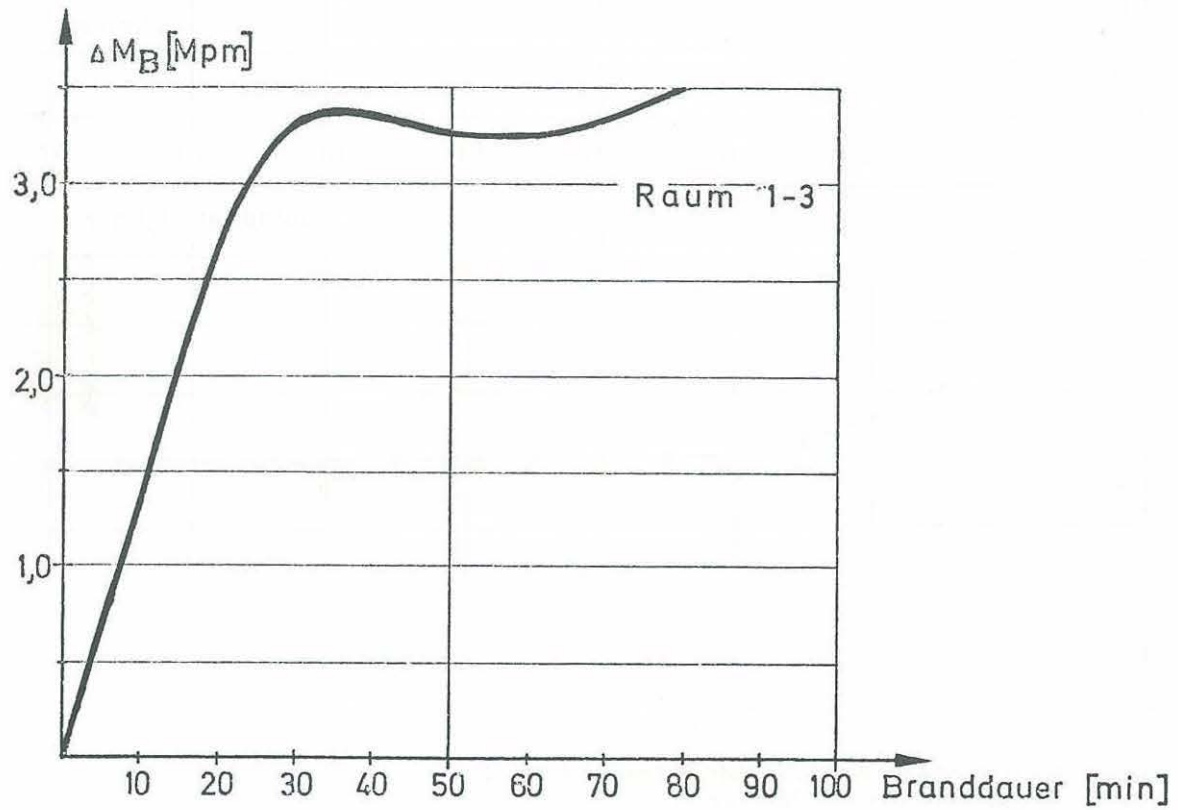
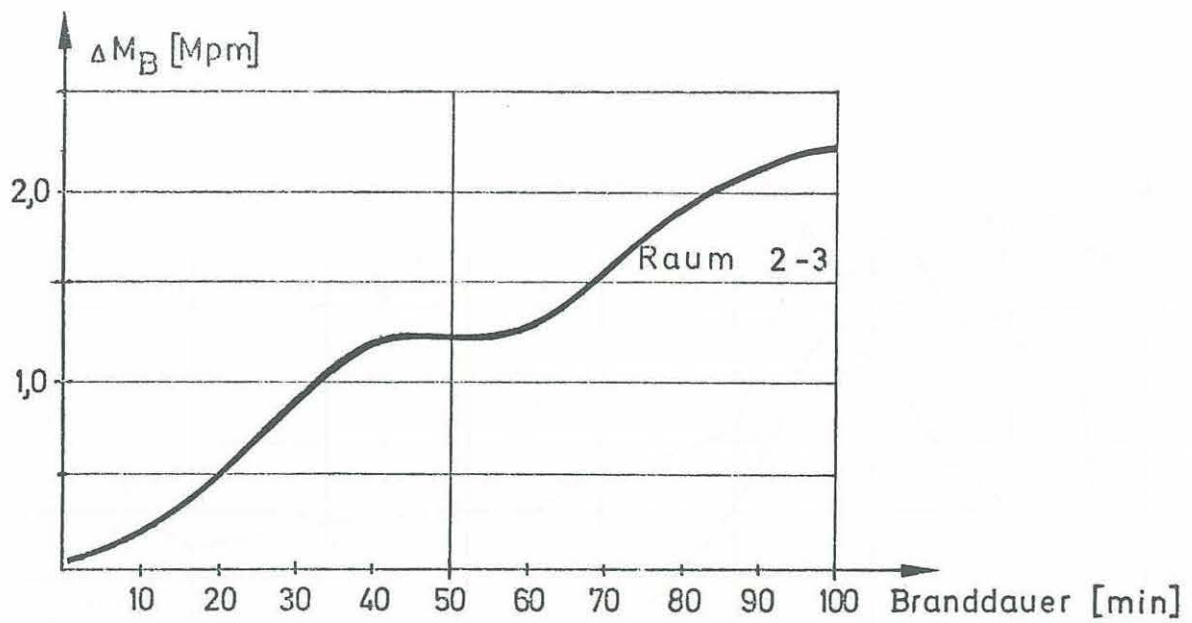
W_V = vertikale Geschwindigkeit 1,5 m über OK Brandraumfenster



↔ Dehnungsmeßstellen
 /// Beflammte Deckenfläche

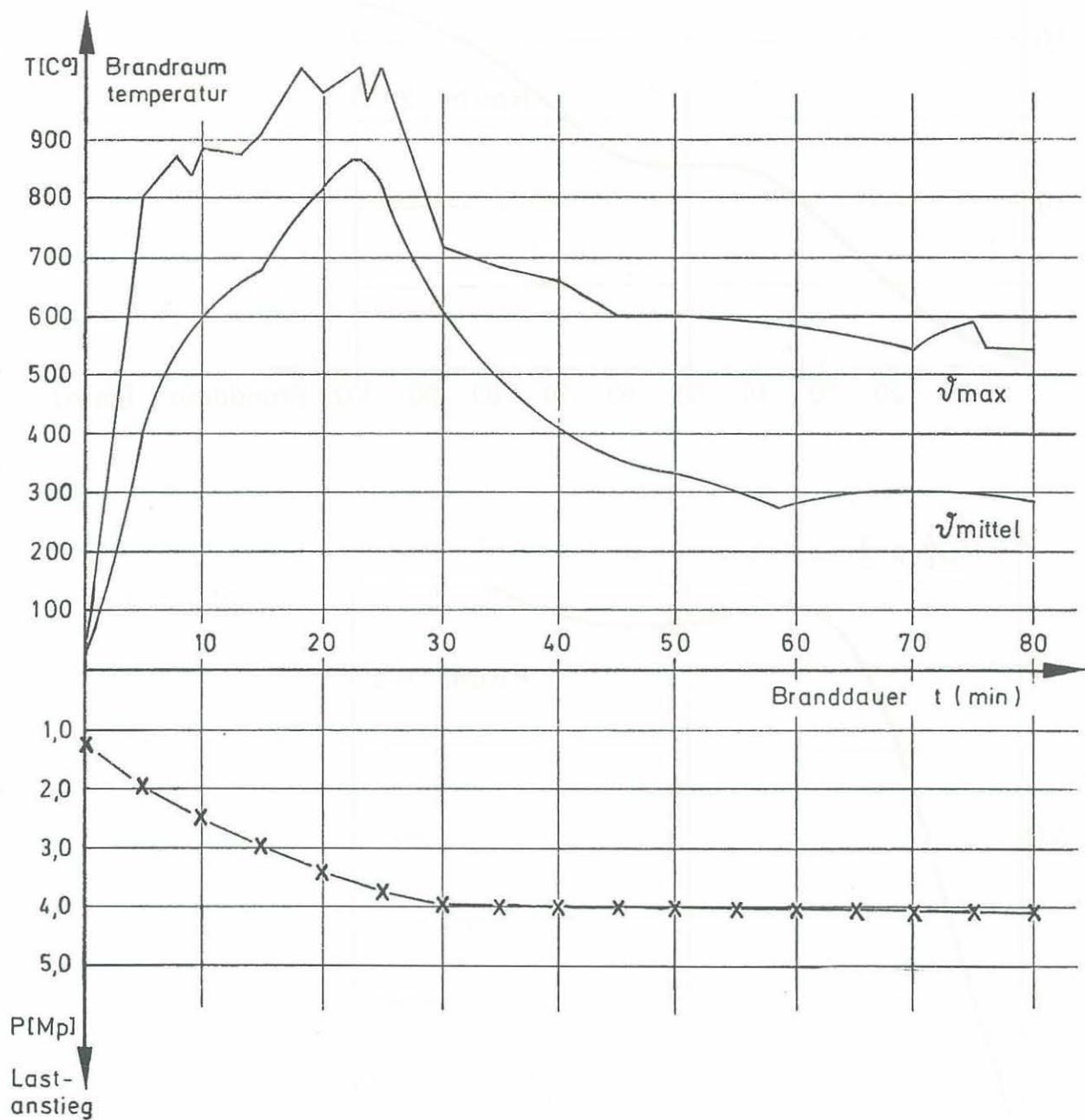
Horizontalverschiebung Decke über Wohnung 11

Anlage zum Versuch 3
 Kap. 7.1 Nr. 1

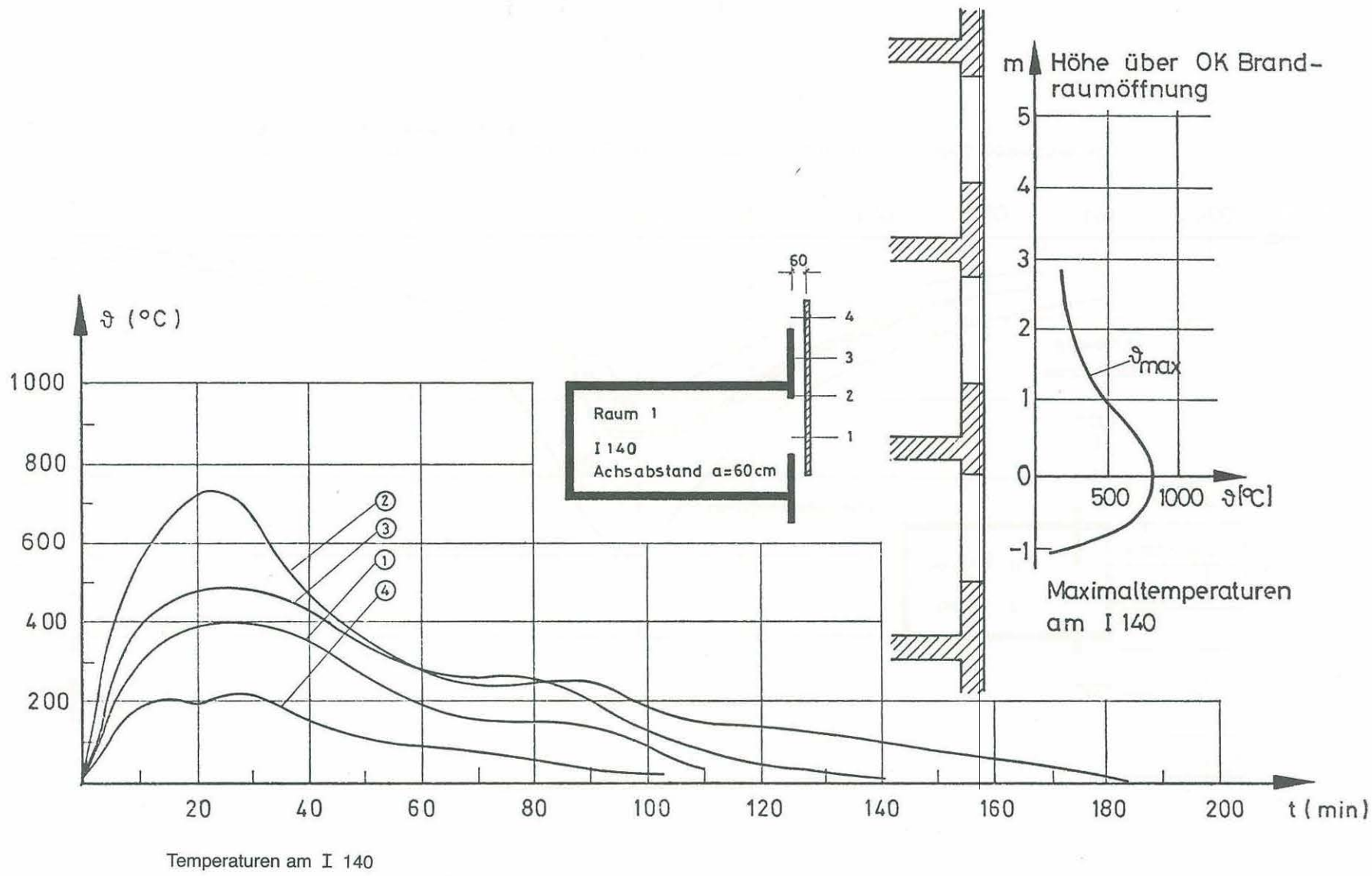


Änderung der Stützmomente der Decke über Wohnung 11 zwischen Raum 1 und 3 bzw. 2 und 3

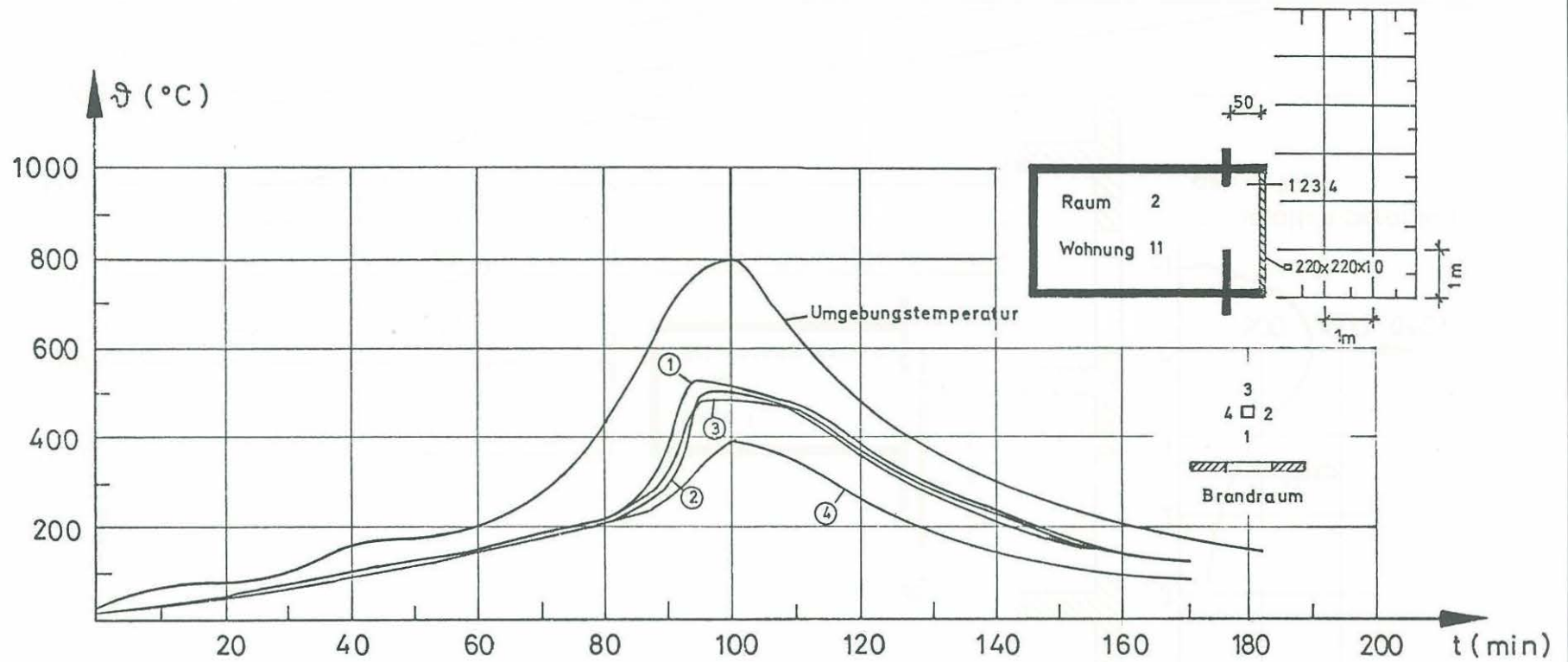
Anlage zum Versuch 3
Kap. 7.1 Nr. 2



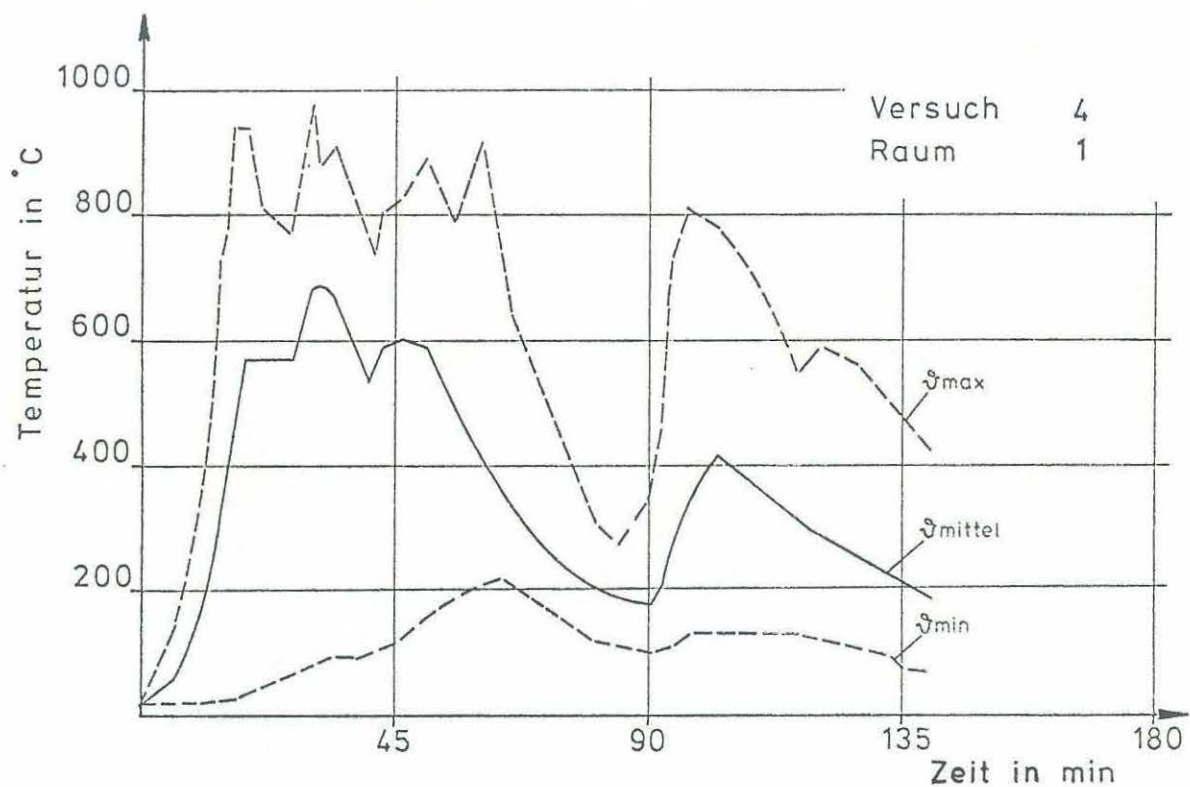
Lastabtragung auf 24 cm Wand zwischen Wohnung 11 und 12
und Brandraumtemperaturen in Wohnung 11



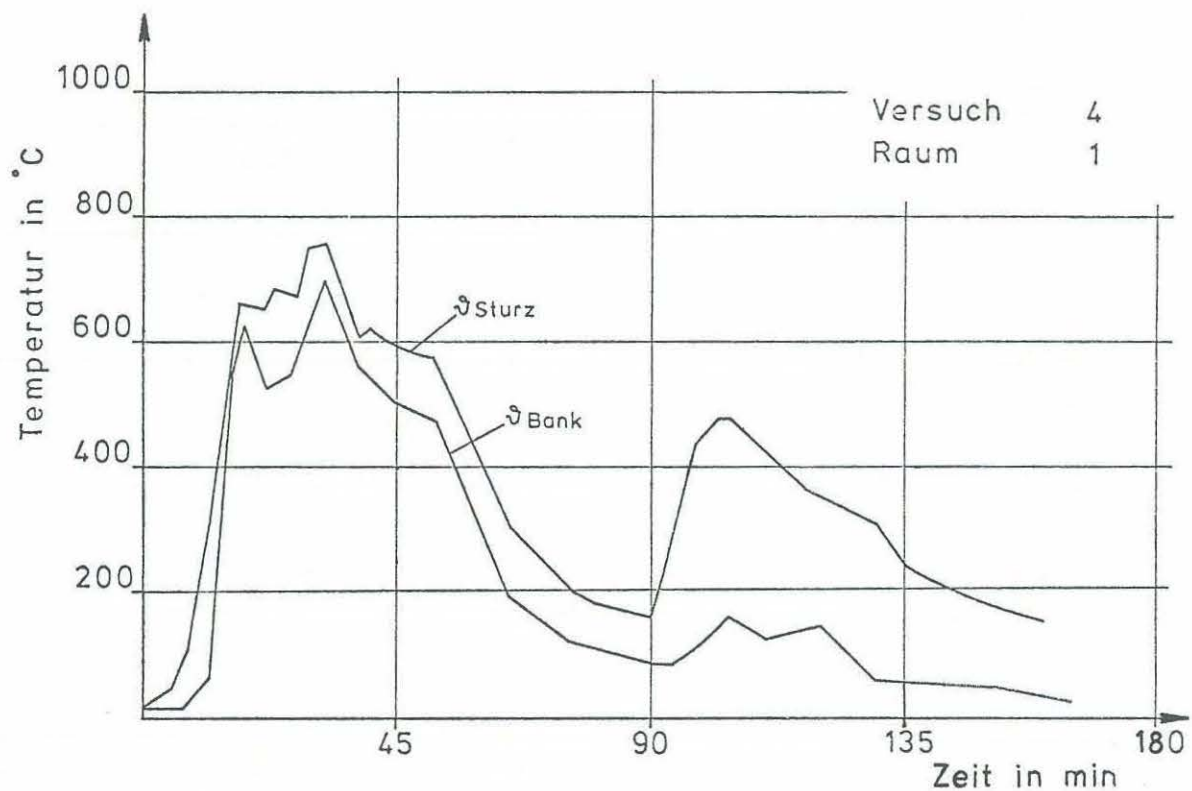
Anlage zum Versuch
Nr. 1
3
Kap. 8.4



Temperaturen am Quadratrohr $220 \times 220 \times 10$, das mit einem Schaumbildner (Teppitex) beschichtet war.
(Meßhorizont: 20 cm unter dem Stützenkopf)

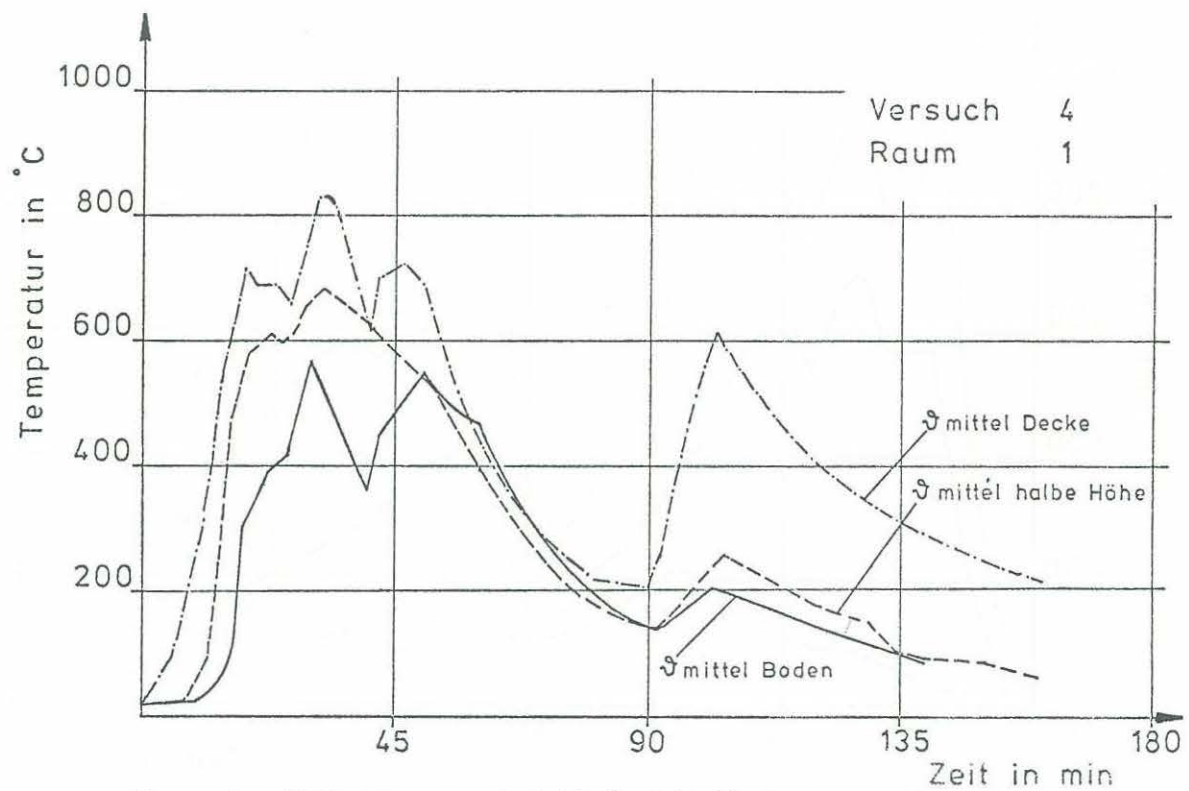


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

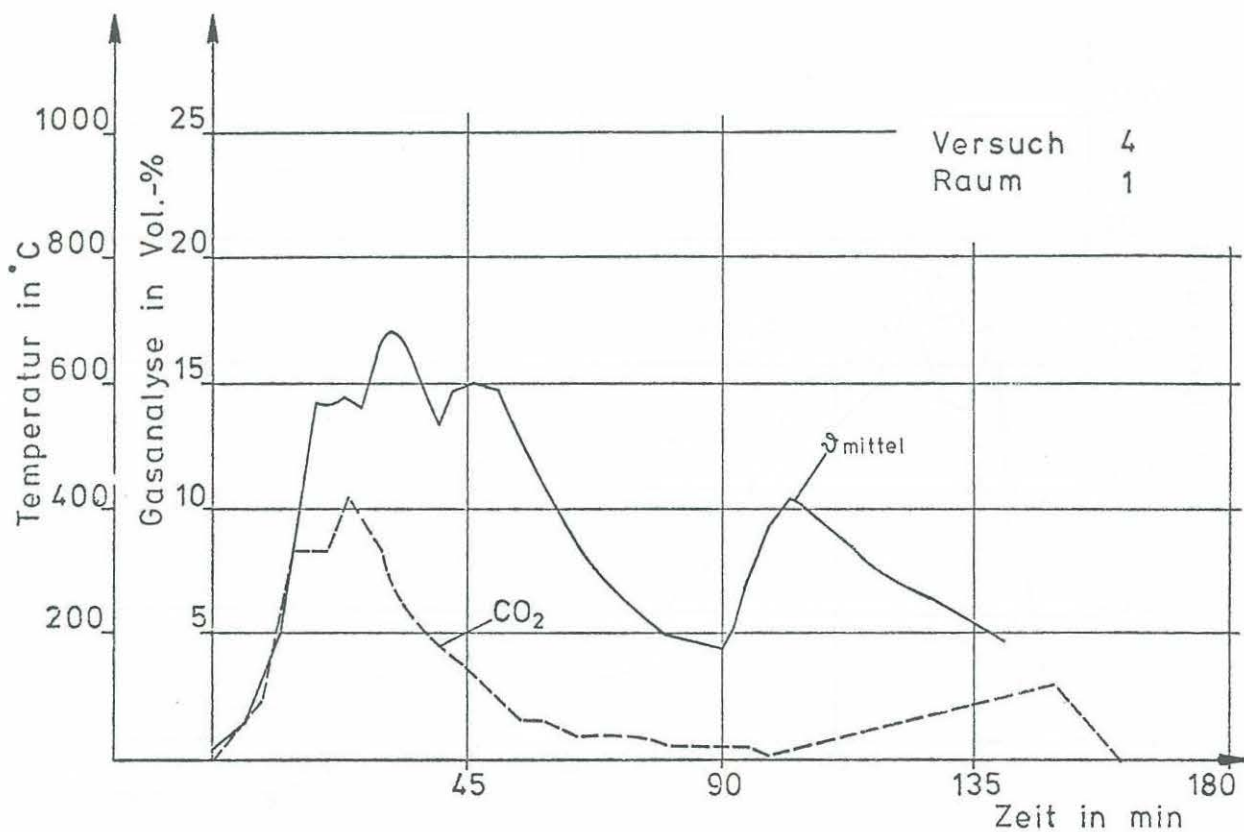


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2

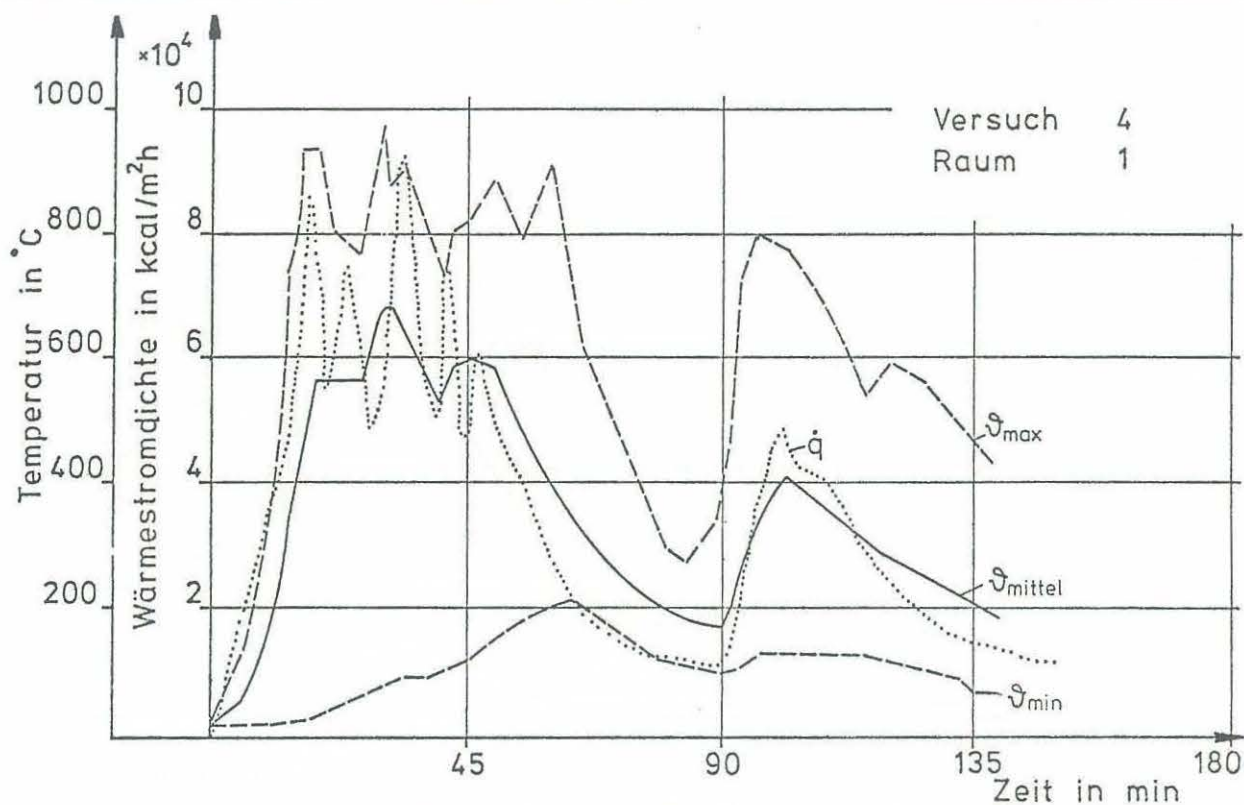


Temperaturschichtung gemessen in drei horizontalen Ebenen

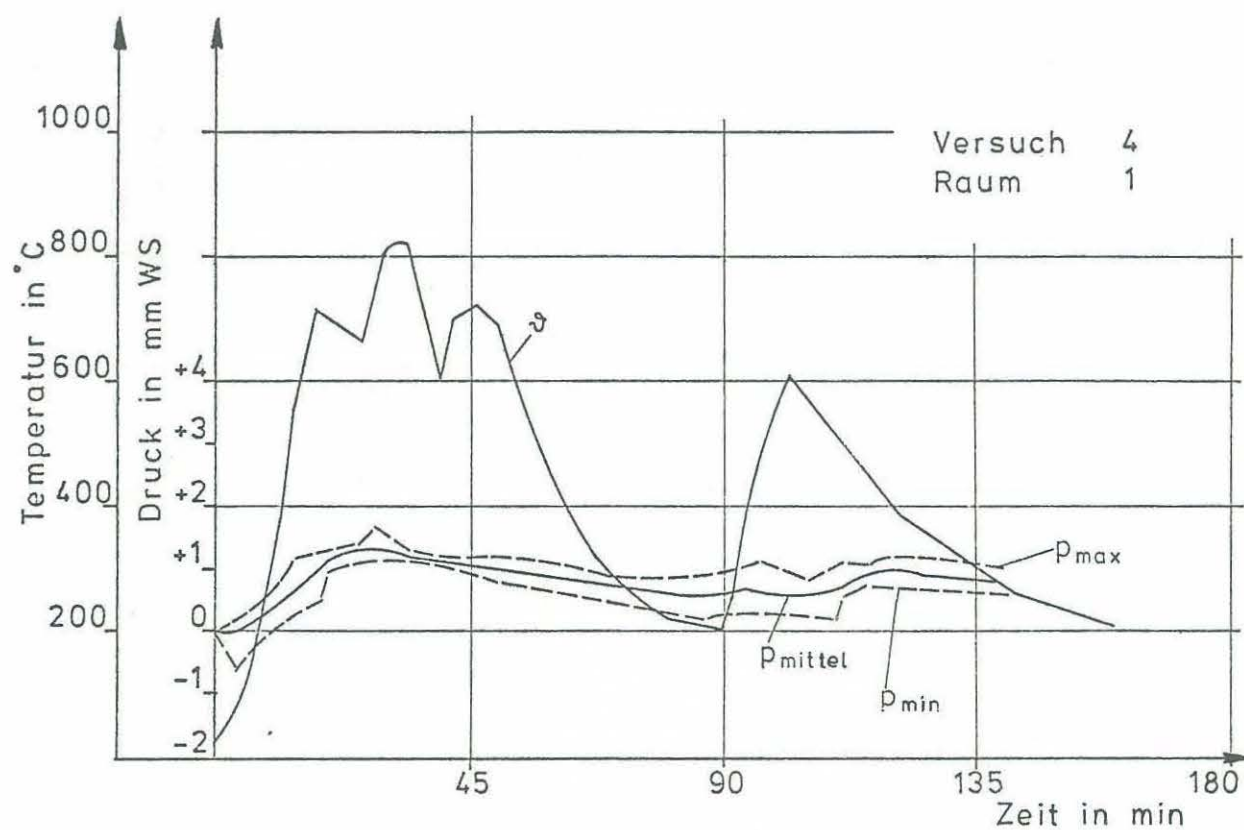


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4

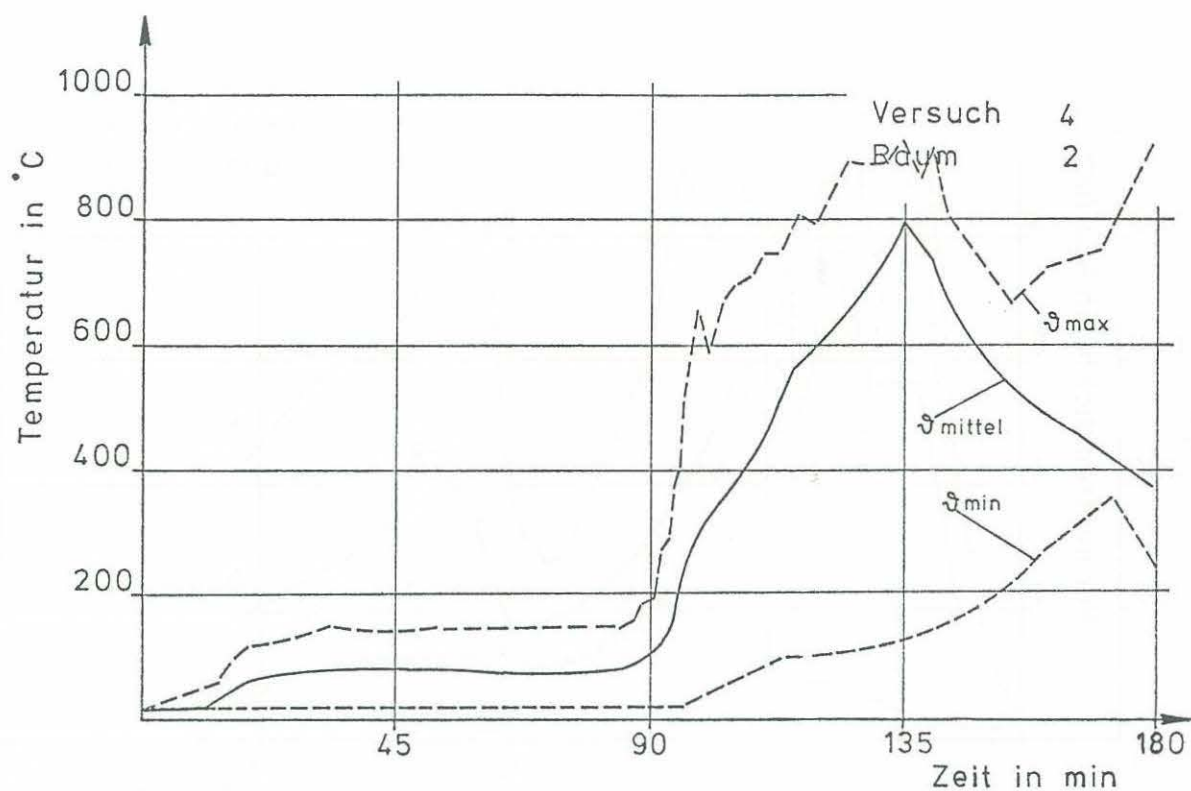


Temperaturstreibereich und Wärmestromdichte in einem Brandraum

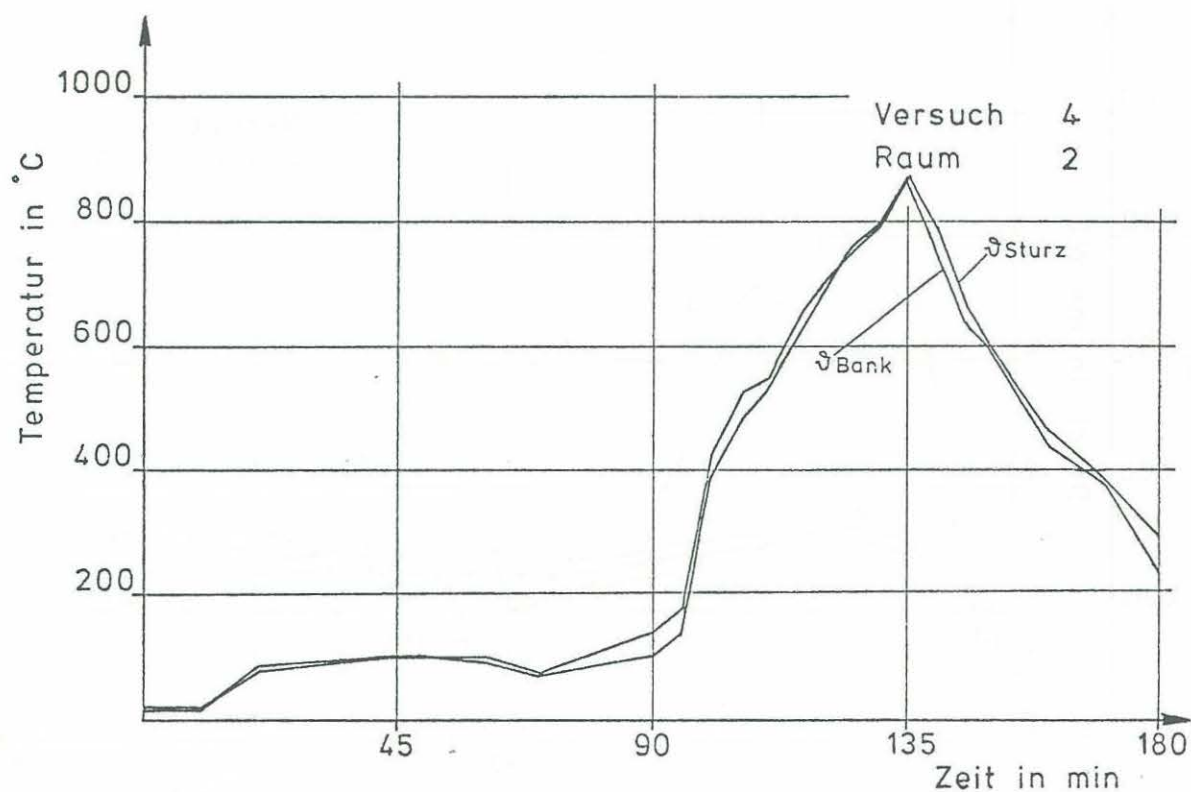


Druckstreibereich unter der Decke und mittlere Deckentemperatur

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 5
Kap. 6.1 Nr. 6

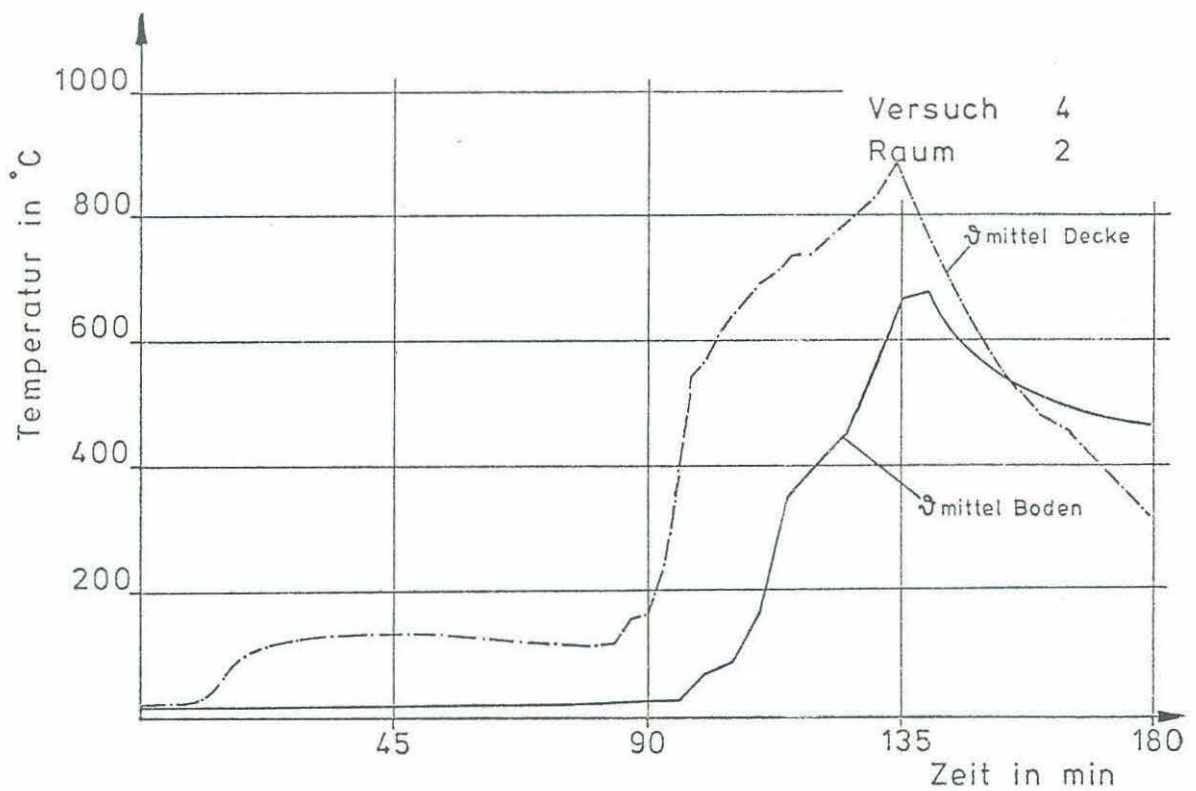


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

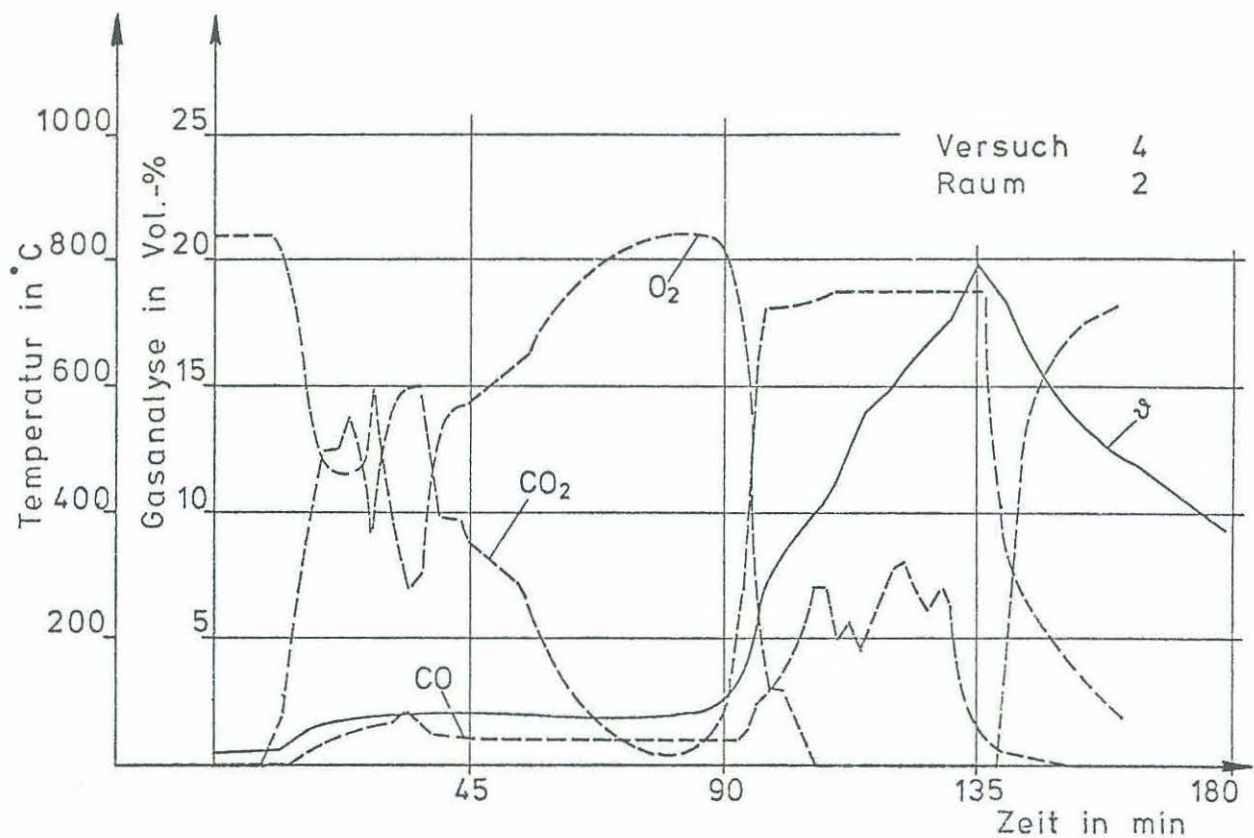


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 7
Kap. 6.1 Nr. 8

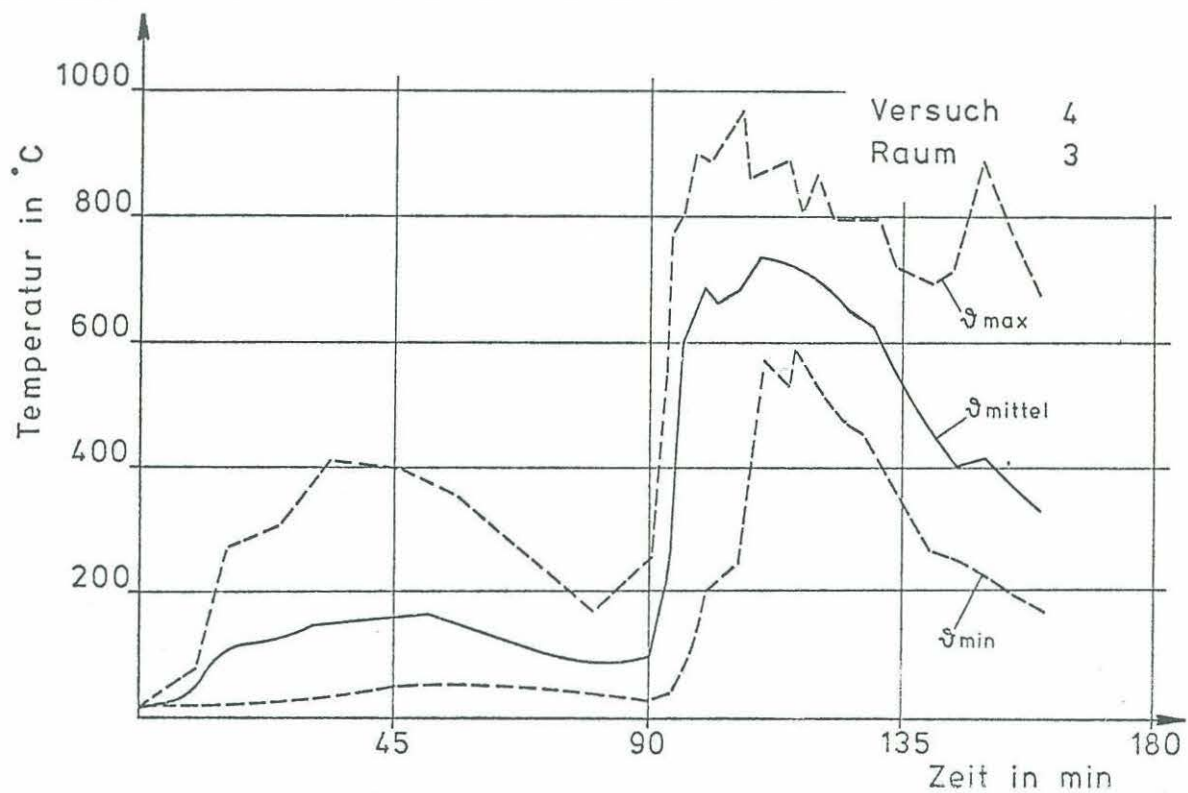


Temperaturschichtung gemessen in zwei horizontalen Ebenen

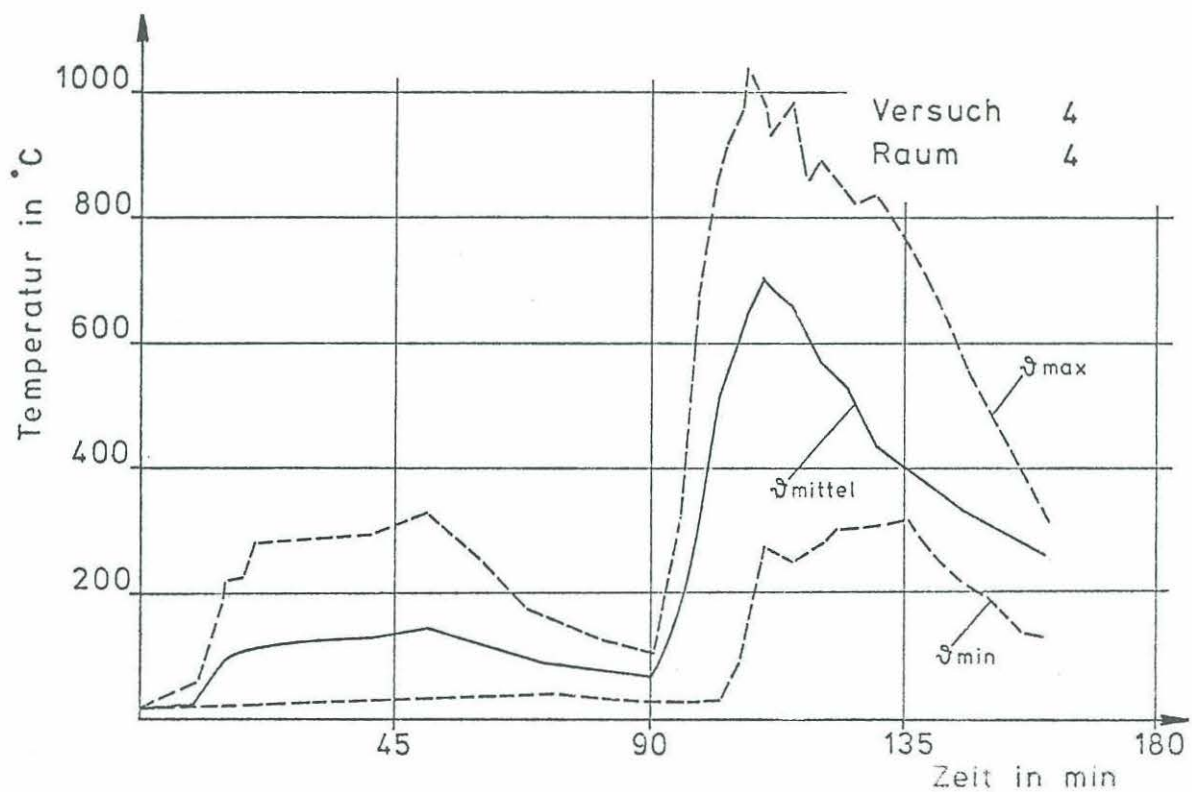


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 9
Kap. 6.1' Nr. 10

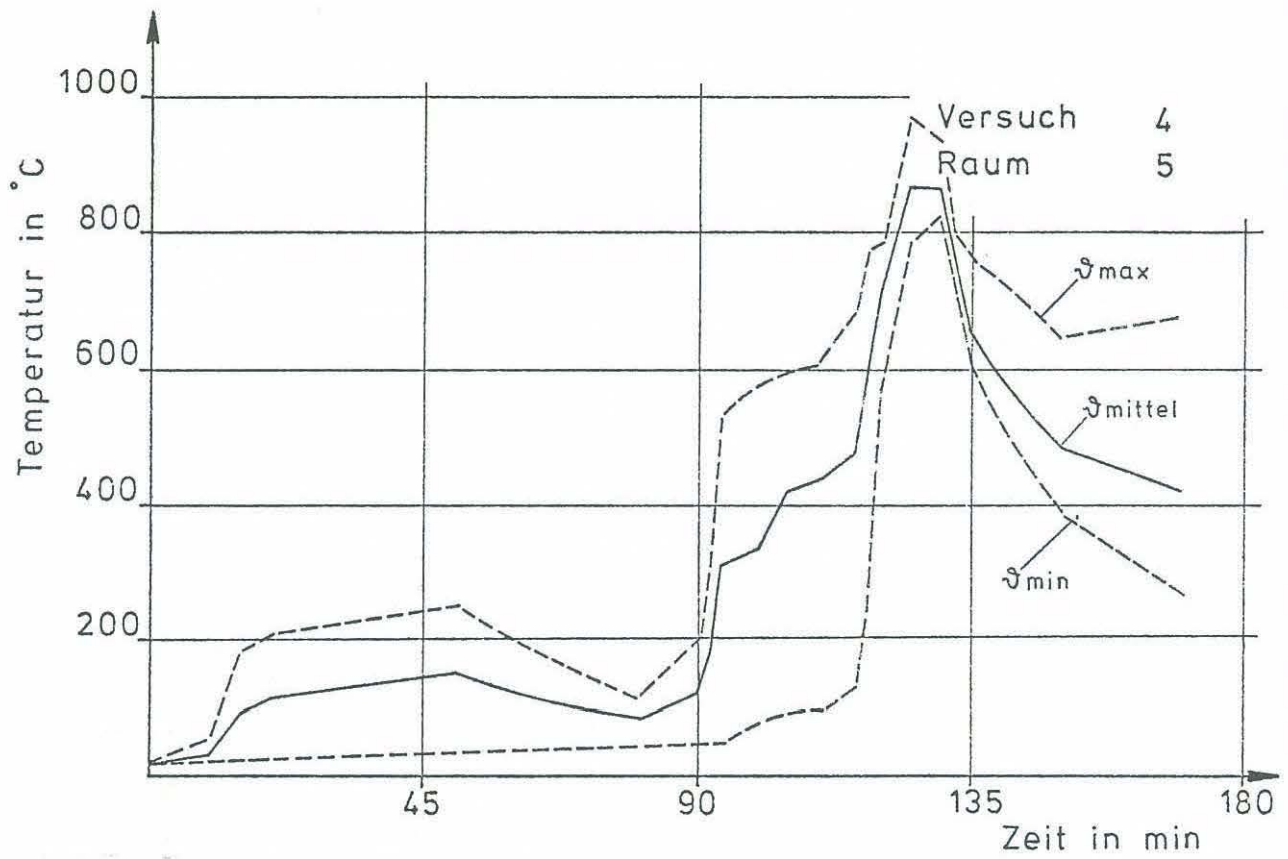


Temperaturstreibereich in einem Brandraum



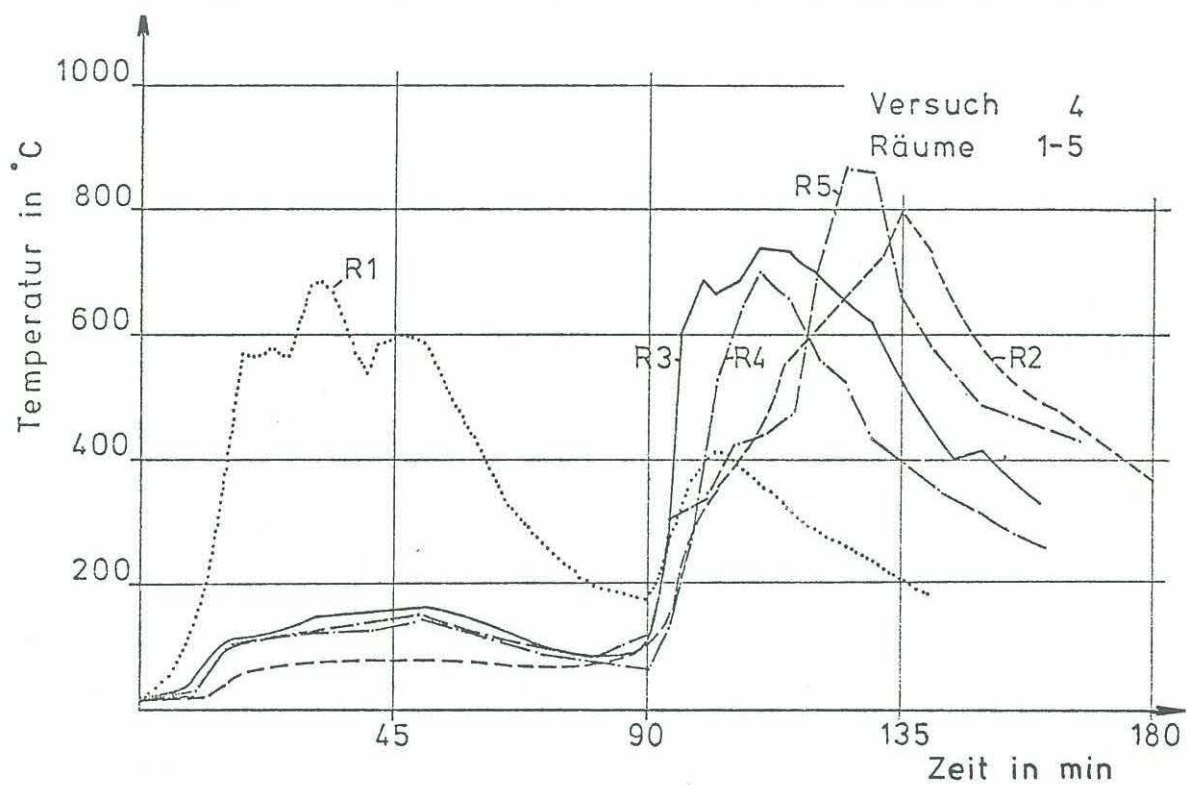
Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 11
Kap. 6.1 Nr. 12

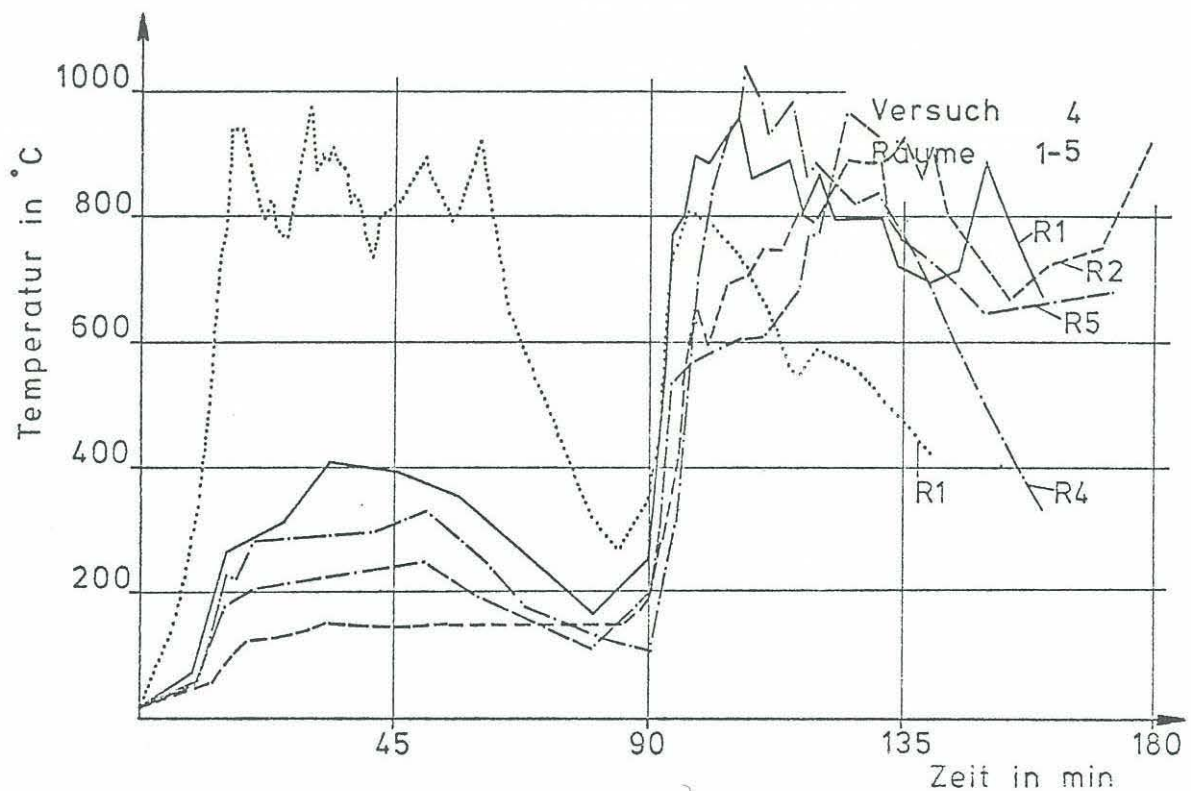


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 13

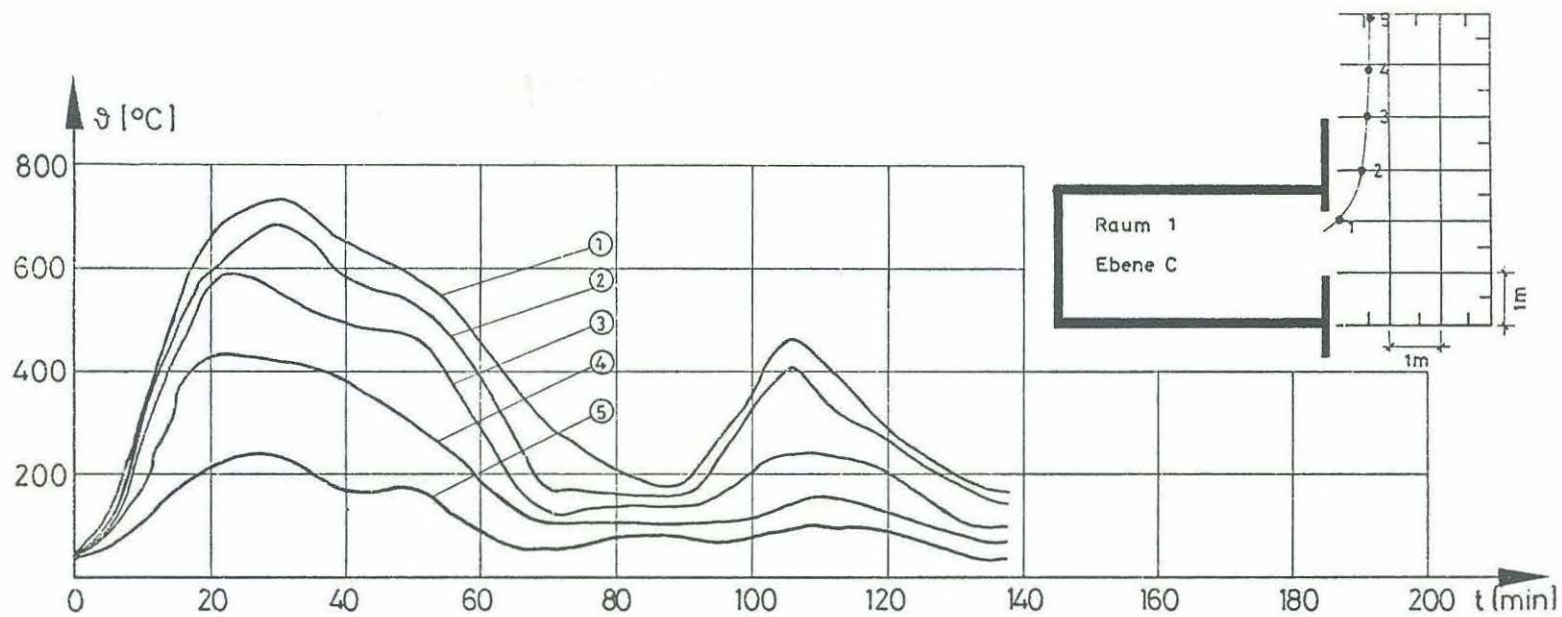


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

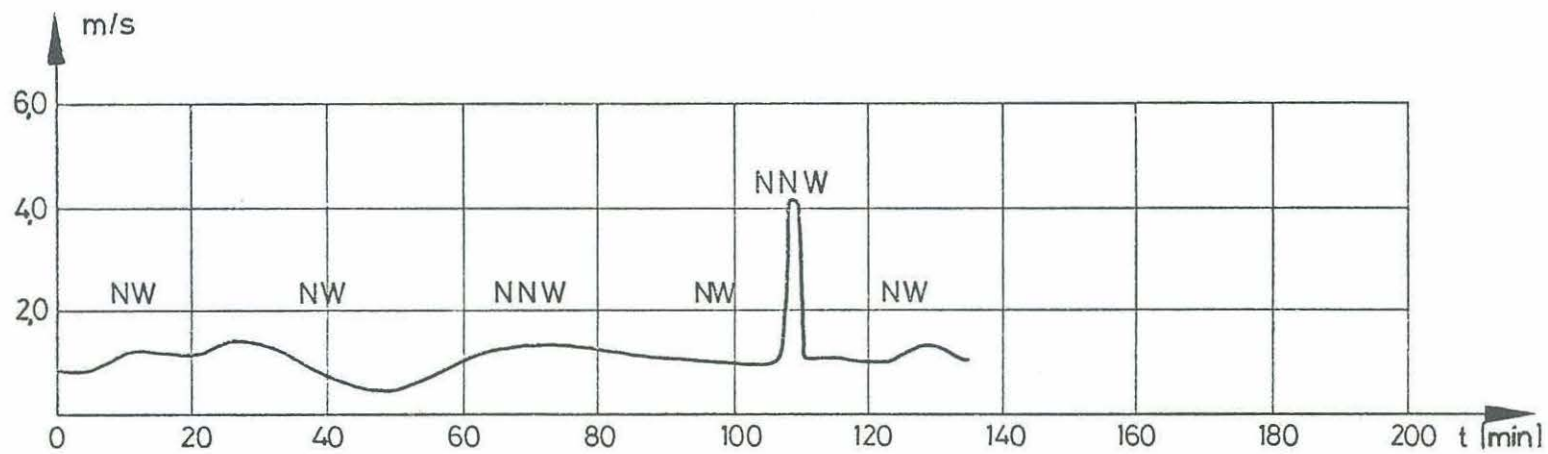


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (maximale Brandraumtemperaturen)

Anlage zum Versuch 4
Kap. 6.1 Nr. 14
Kap. 6.1 Nr. 15

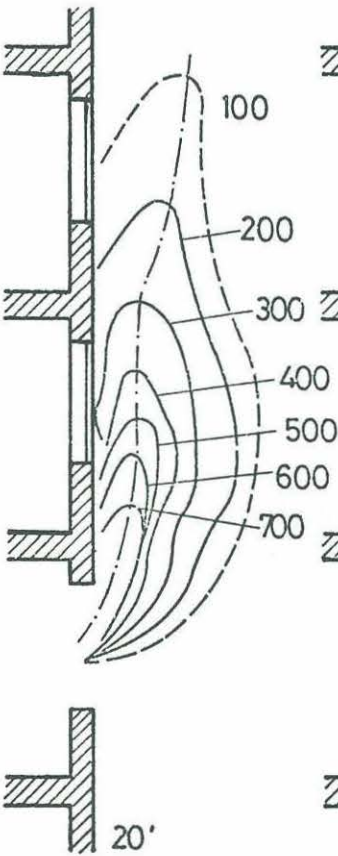
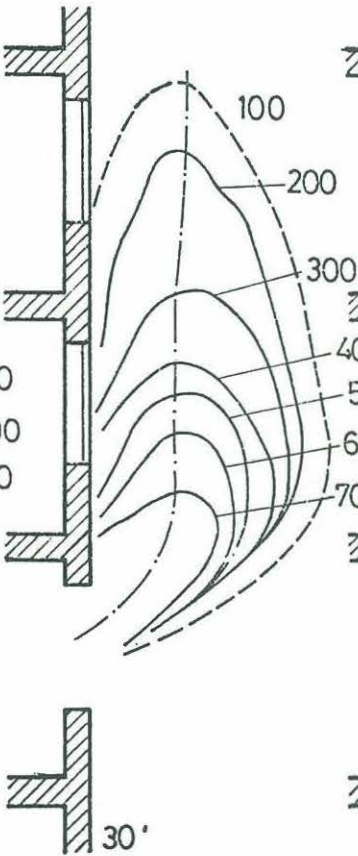
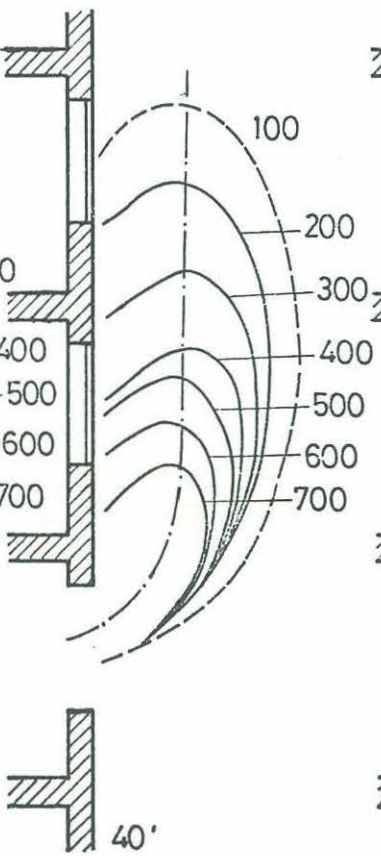
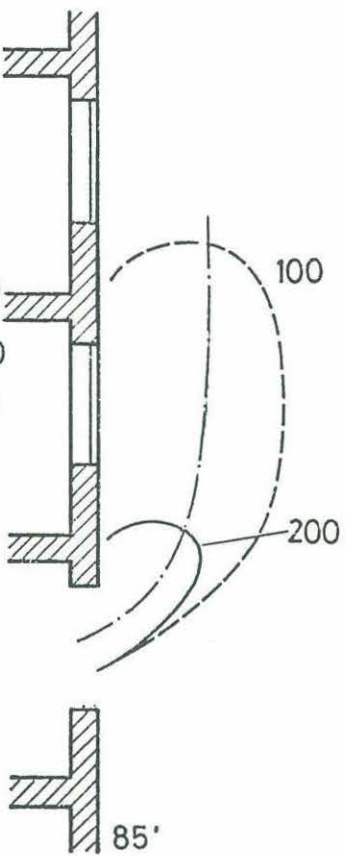
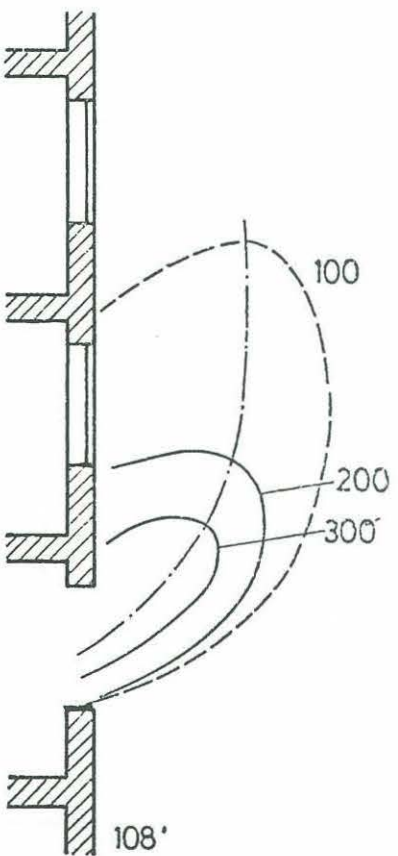


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene C)



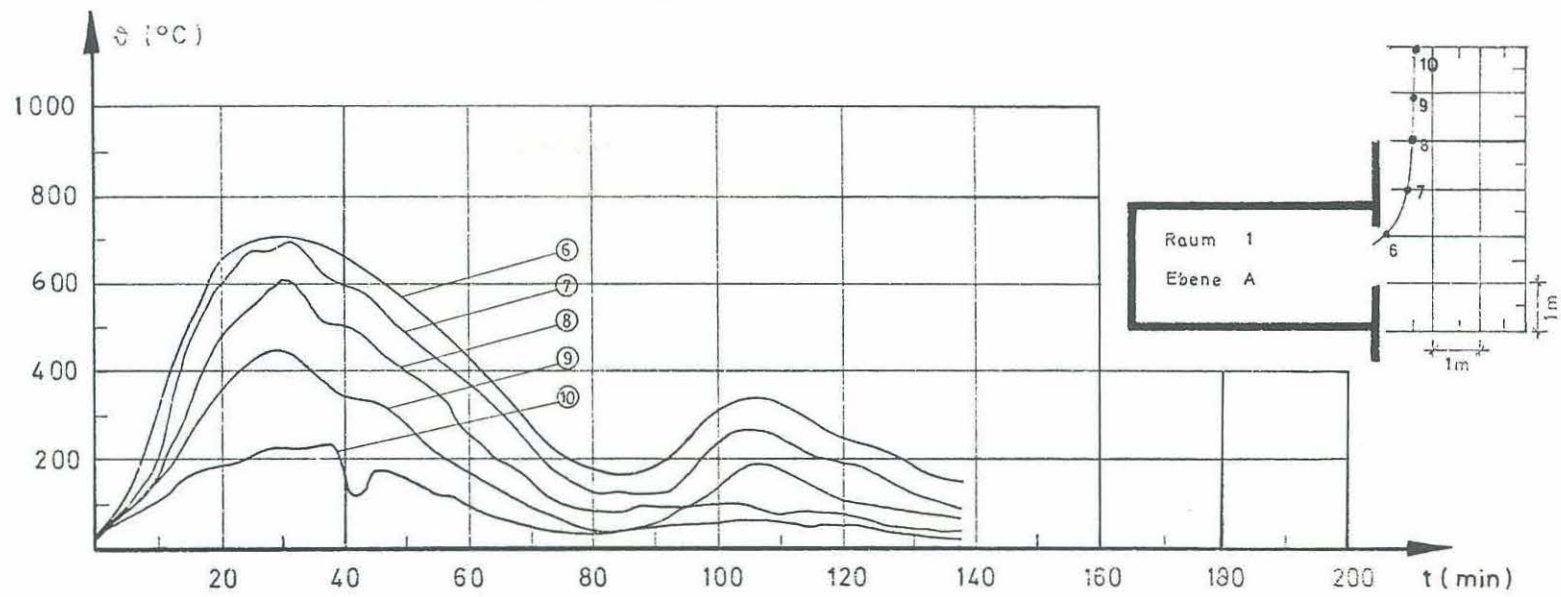
Windgeschwindigkeit und -richtung

Anlage zum Versuch
Kap. 6.2
Nr. 1 4

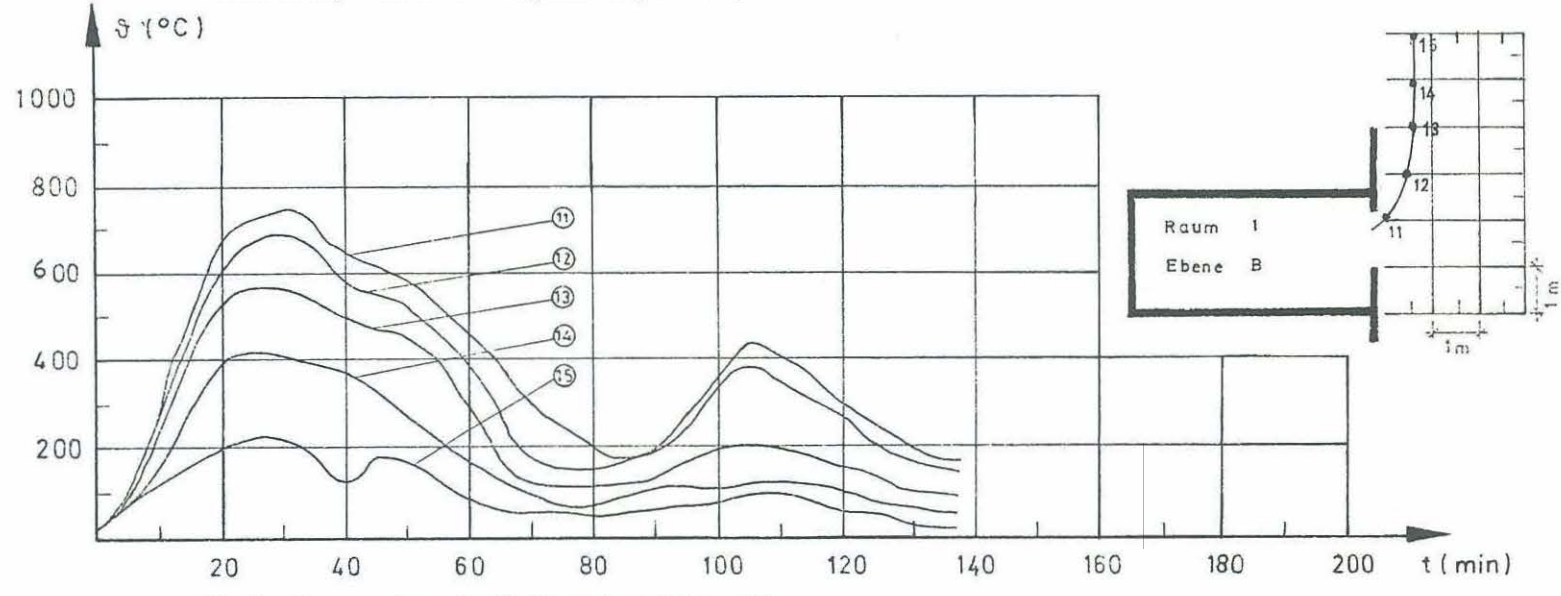


Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Ebene C)

Anlage zum Versuch
Nr. 2

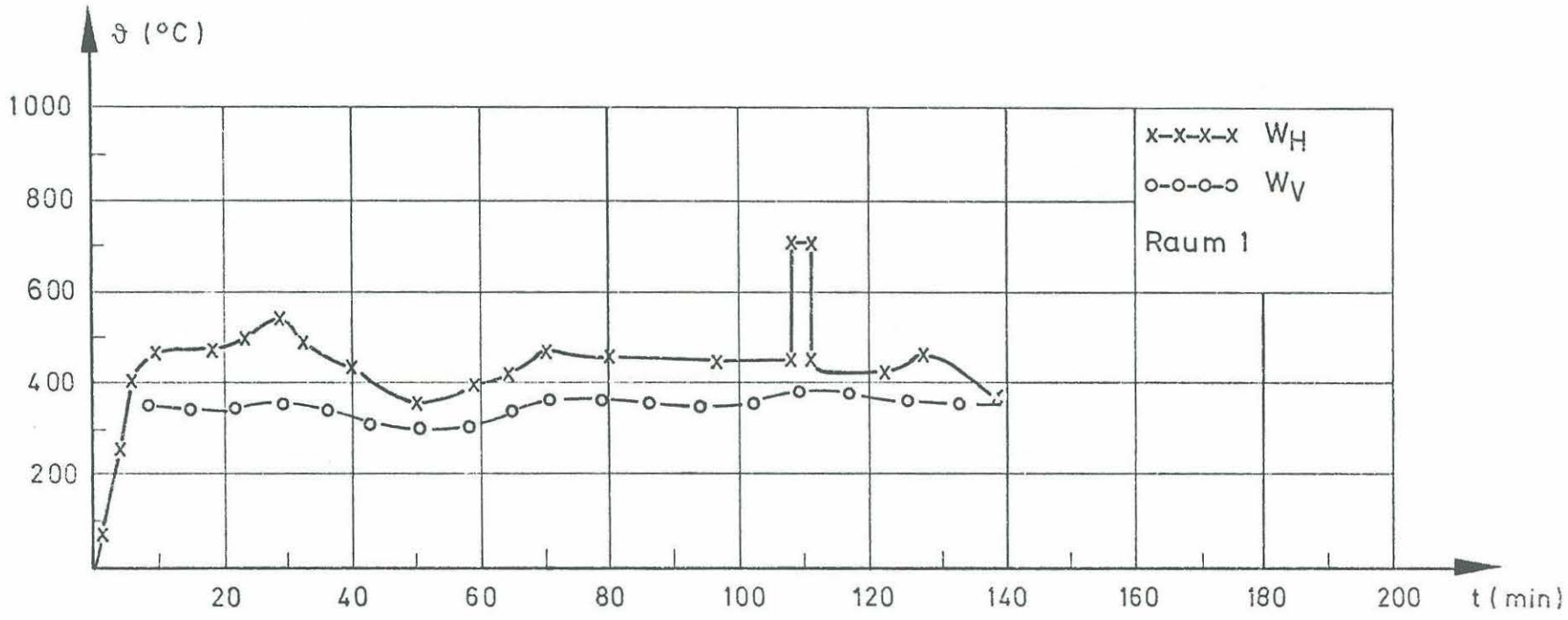


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene A)

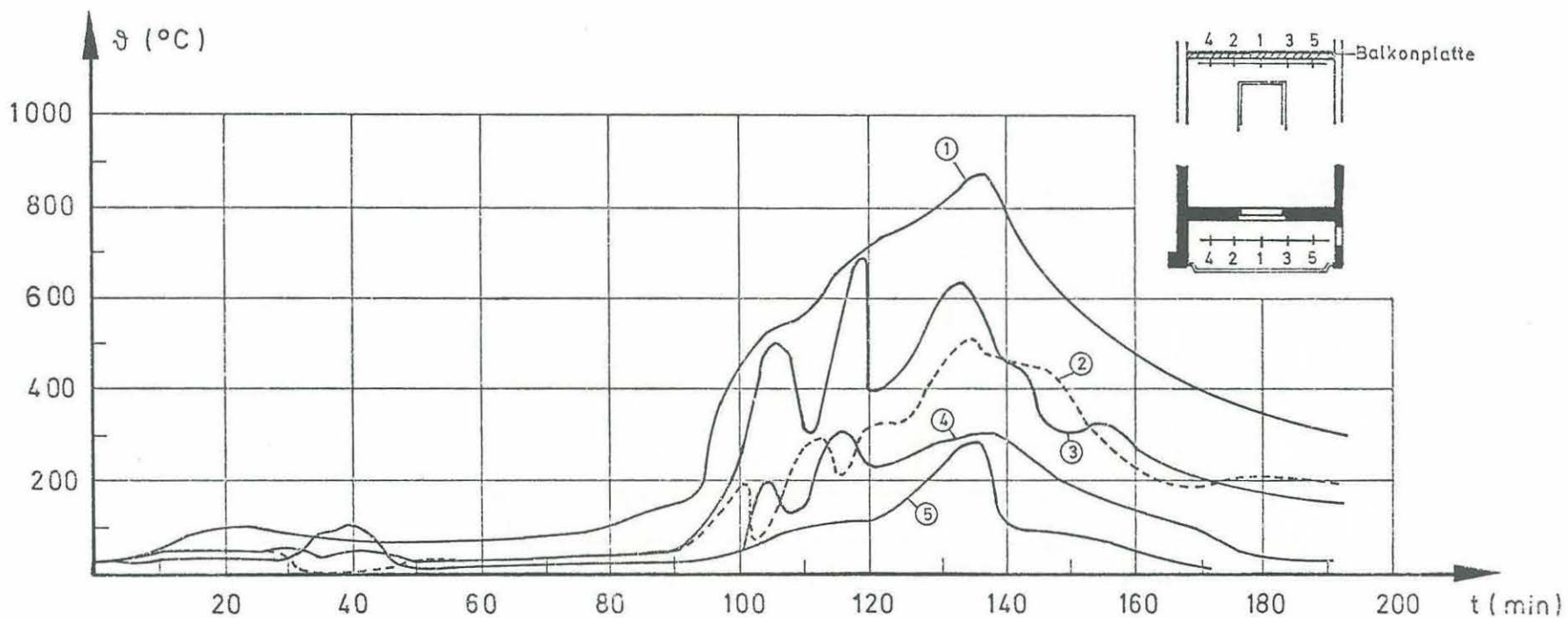
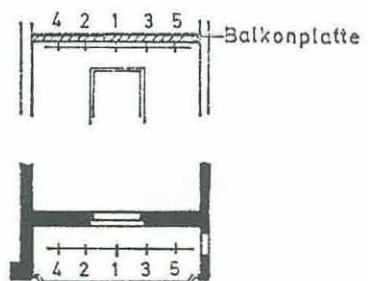


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene B)

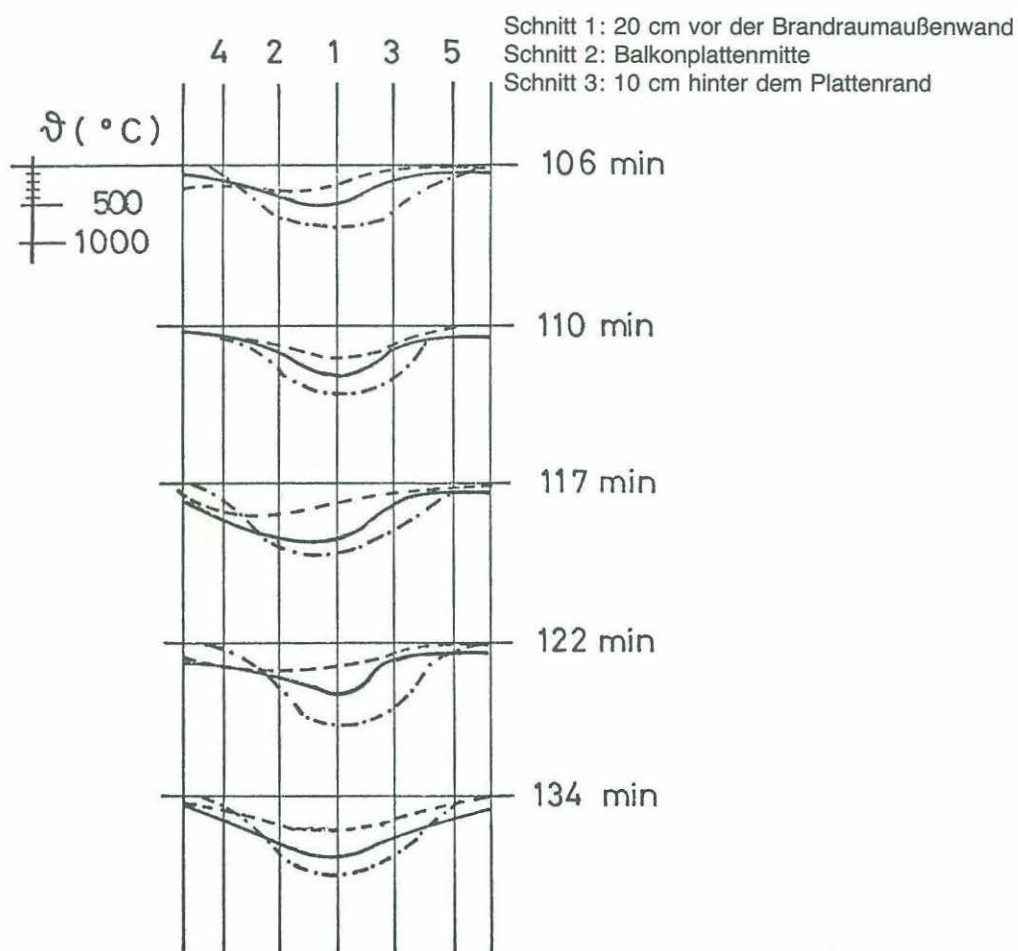
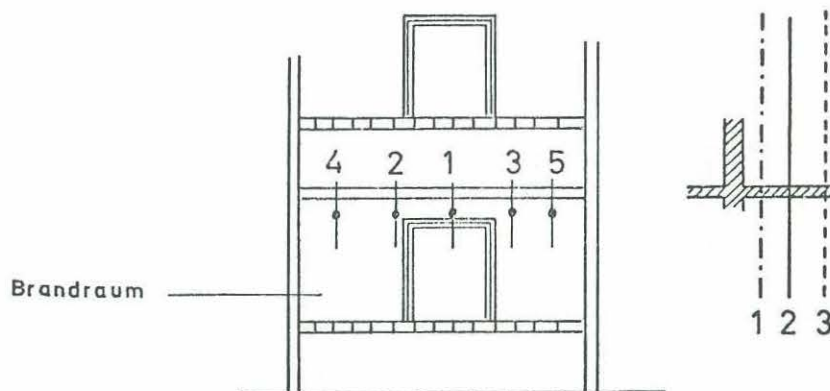
Anlage zum Versuch
Nr. 3 4
Kap. 6.2



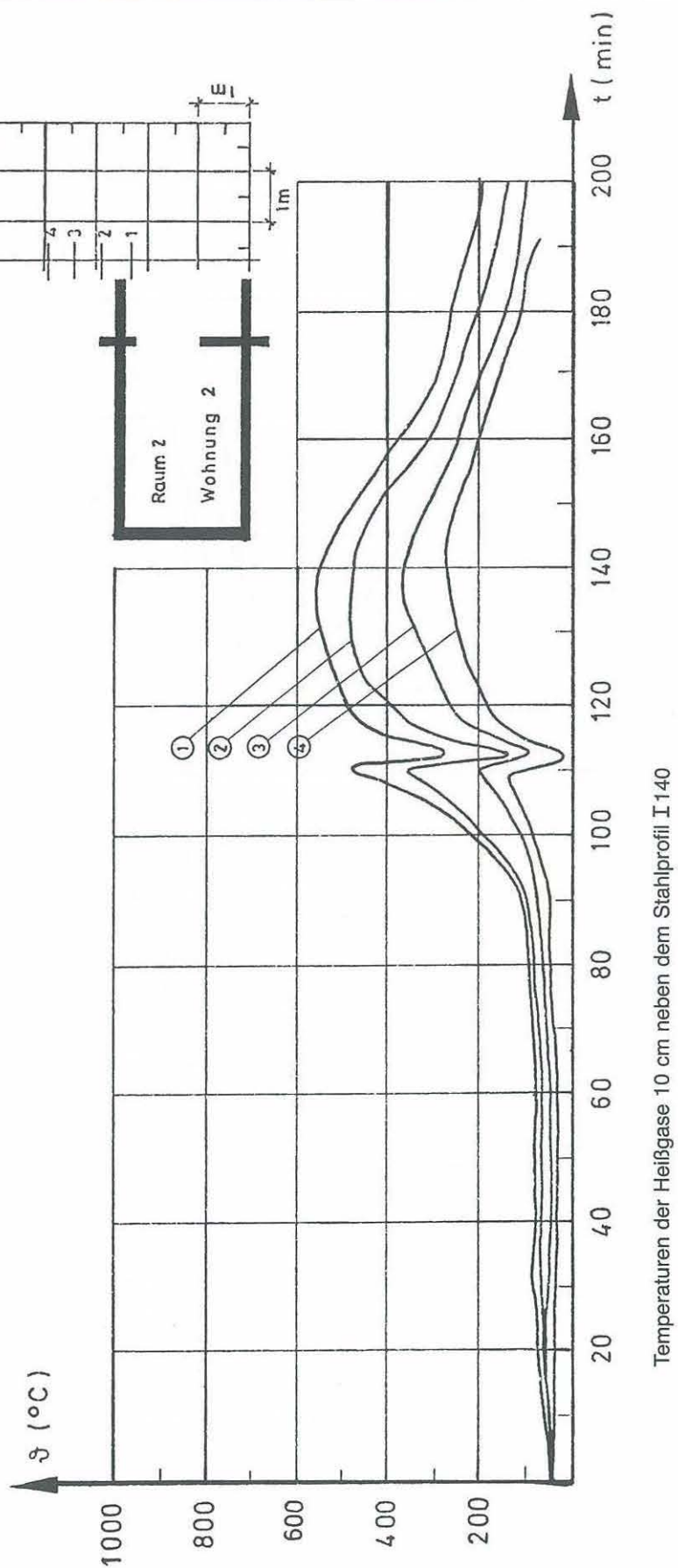
Verlauf der Heißgasgeschwindigkeit
W_H = horizontale Geschwindigkeit 20 cm unter OK Brandraumfenster
W_V = vertikale Geschwindigkeit 1,5 m über OK Brandraumfenster



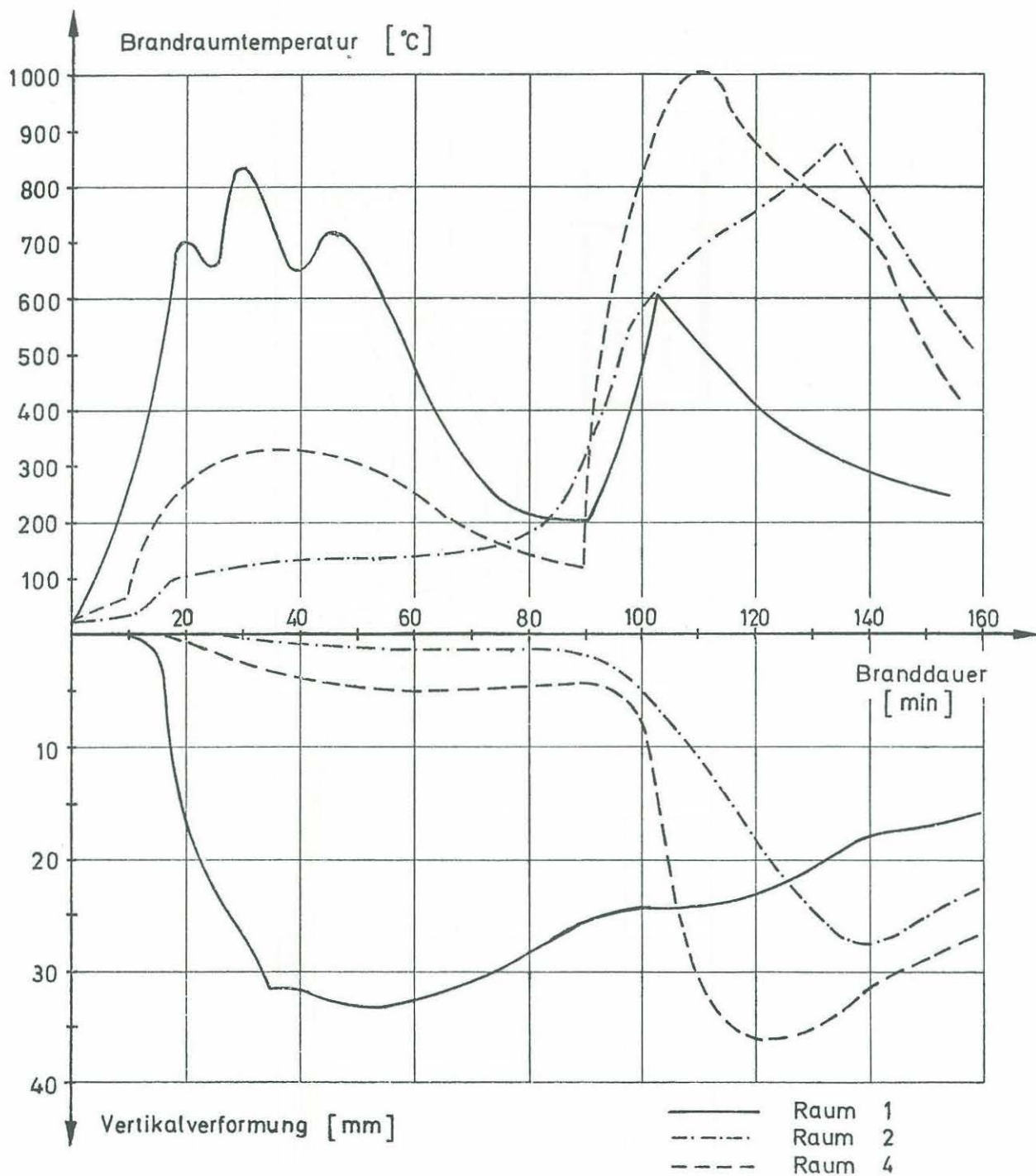
Heißgastemperaturen 10 cm unter der Balkonplatte vor Raum 2



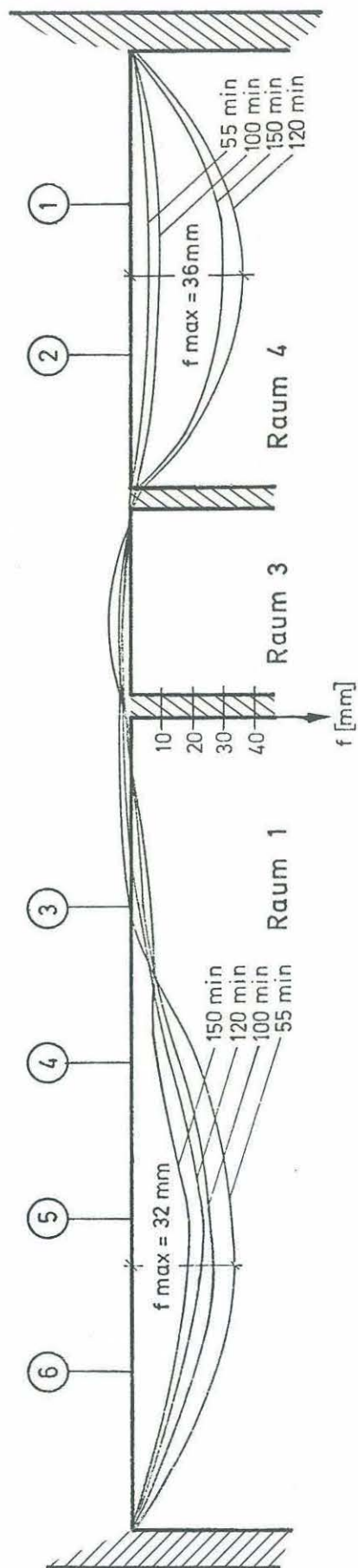
Graphische Darstellung der Heißgastemperaturen unter der Balkonplatte



Temperaturen der Heißgase 10 cm neben dem Stahlprofil I 140



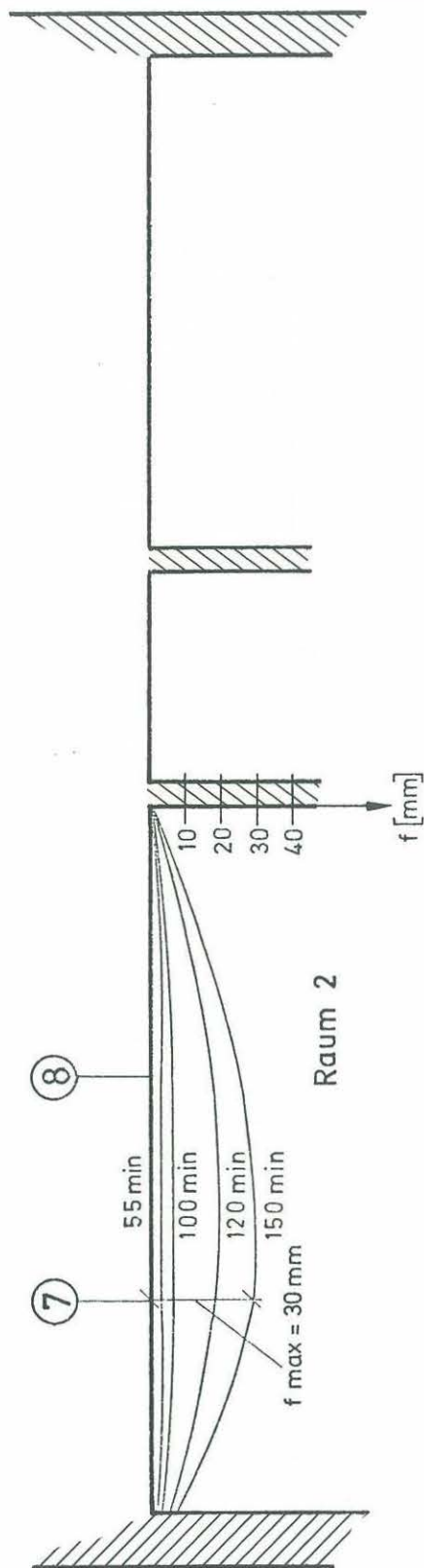
Brandraumtemperaturen Wohnung 2 – Maximalverformungen Decke über Wohnung 2



Biegelinie Decke über Wohnung 2 (Raum 1–4)

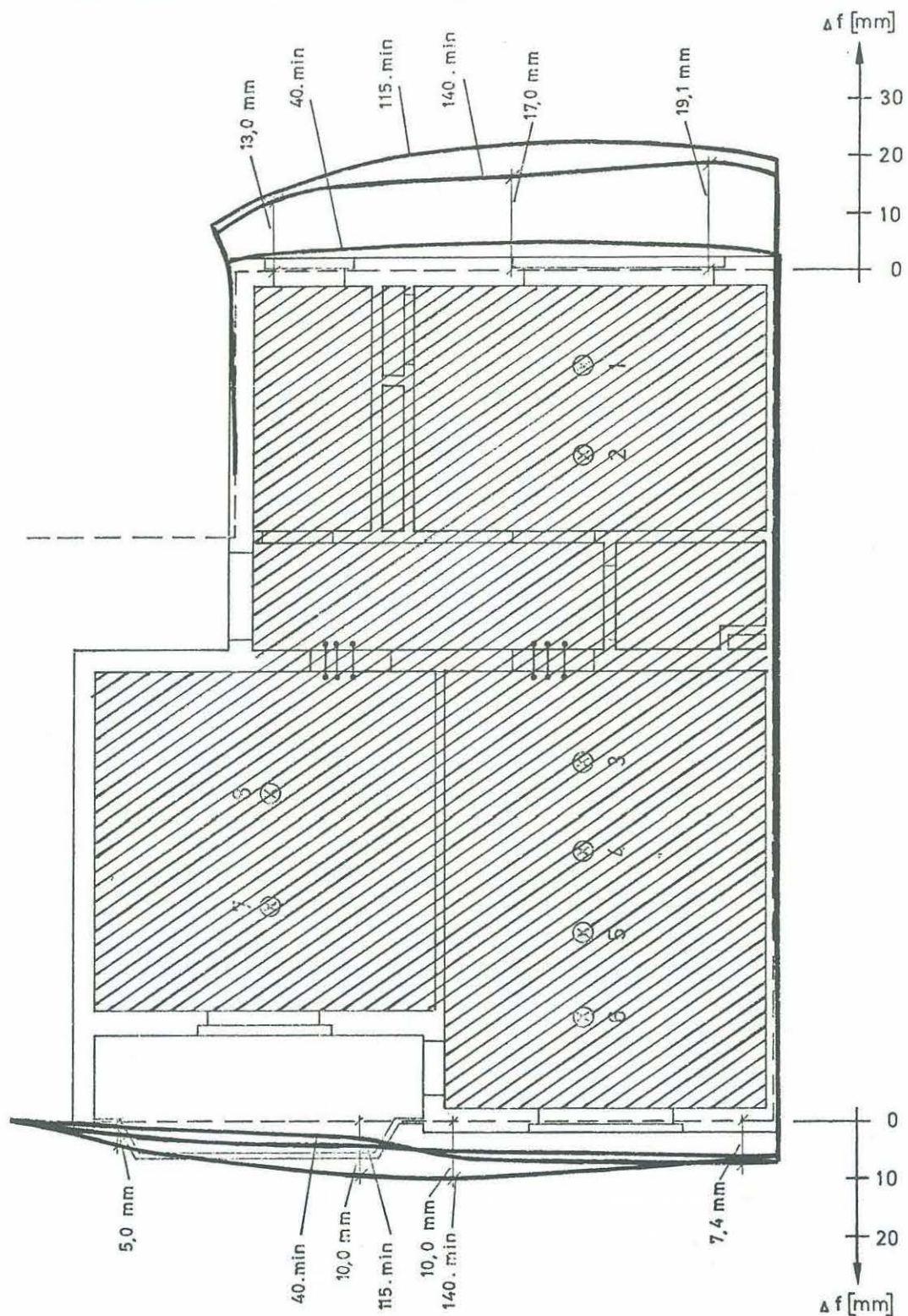
Anlage zum Versuch
Kap. 7.1

4
Nr. 2



Biegelinie Decke über Wohnung 2 (Raum 2)

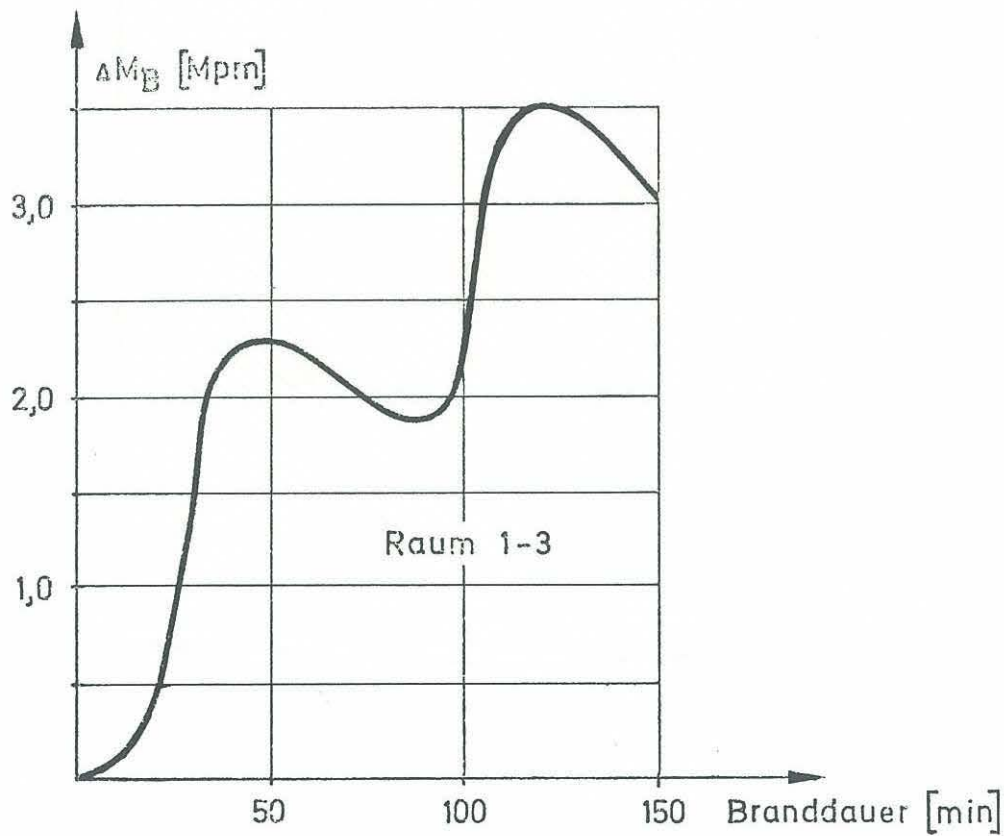
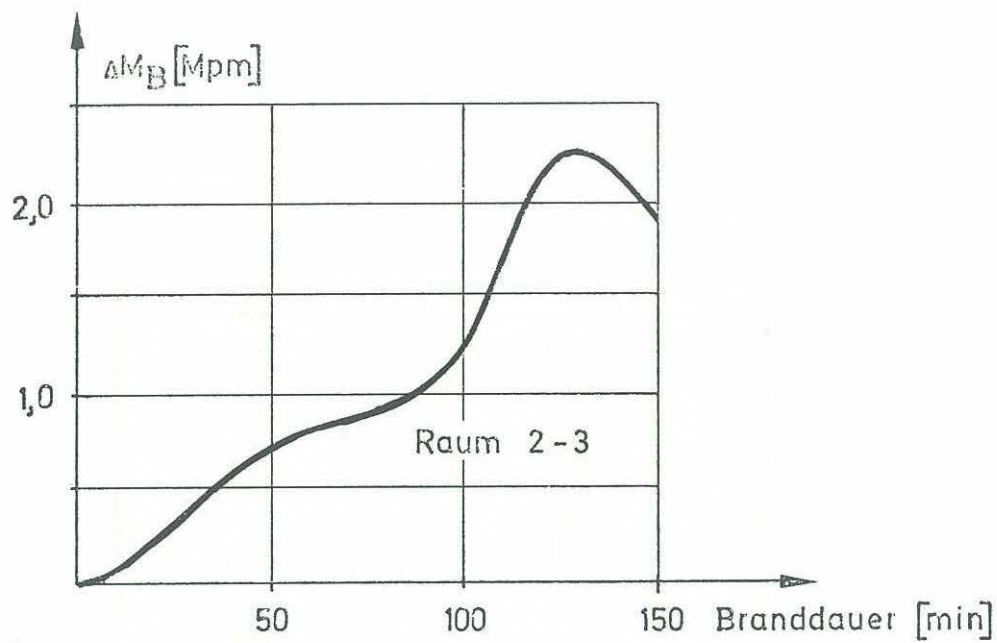
Anlage zum Versuch 4
Kap. 7.1 Nr. 3



- ⊗ Verformungsmeßstellen
- Dehnungsmeßstellen
- /// Beflammte Deckenfläche

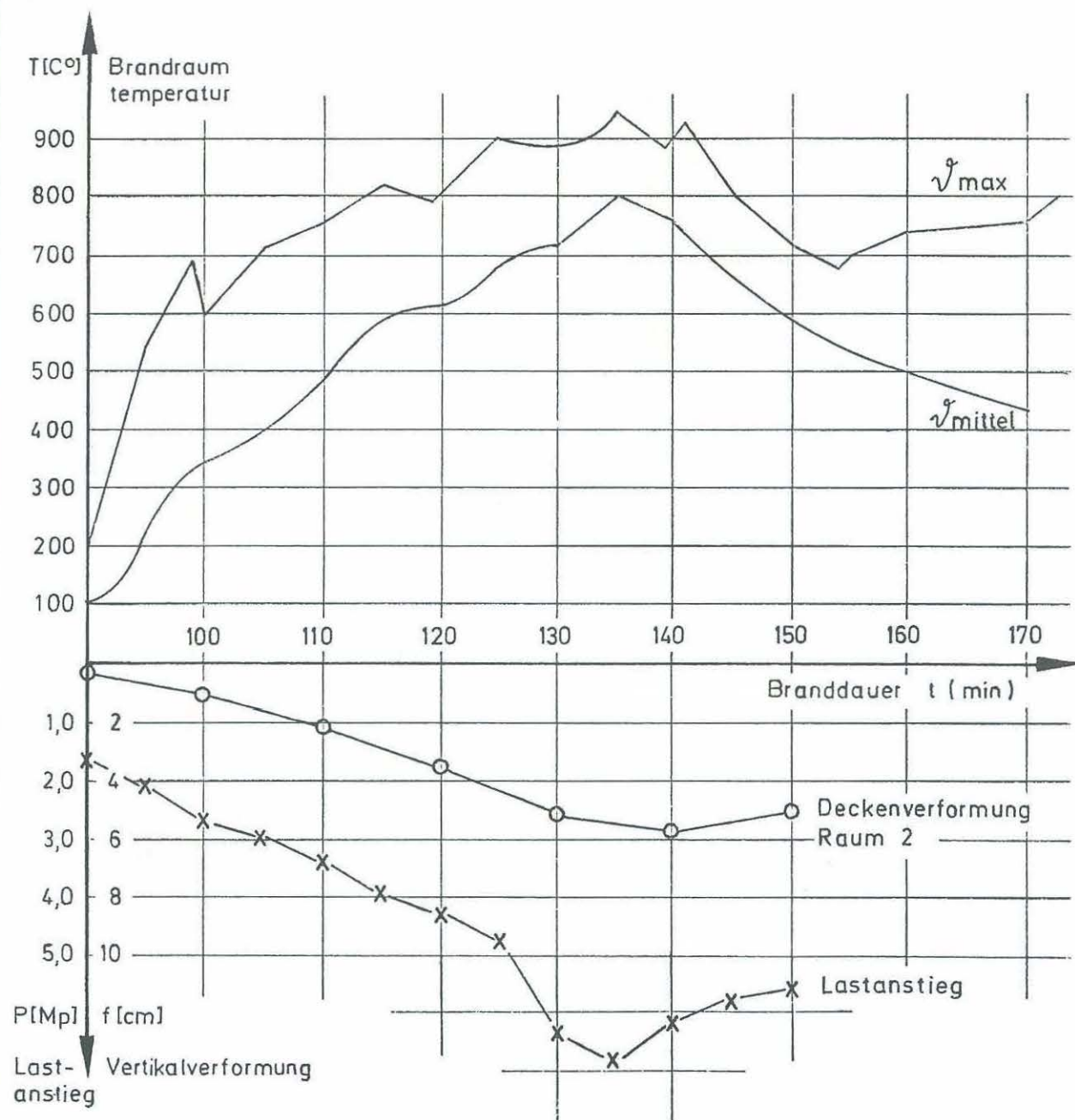
Horizontalverschiebung Decke über Wohnung 2

Anlage zum Versuch 4
Kap. 7.1 Nr. 4



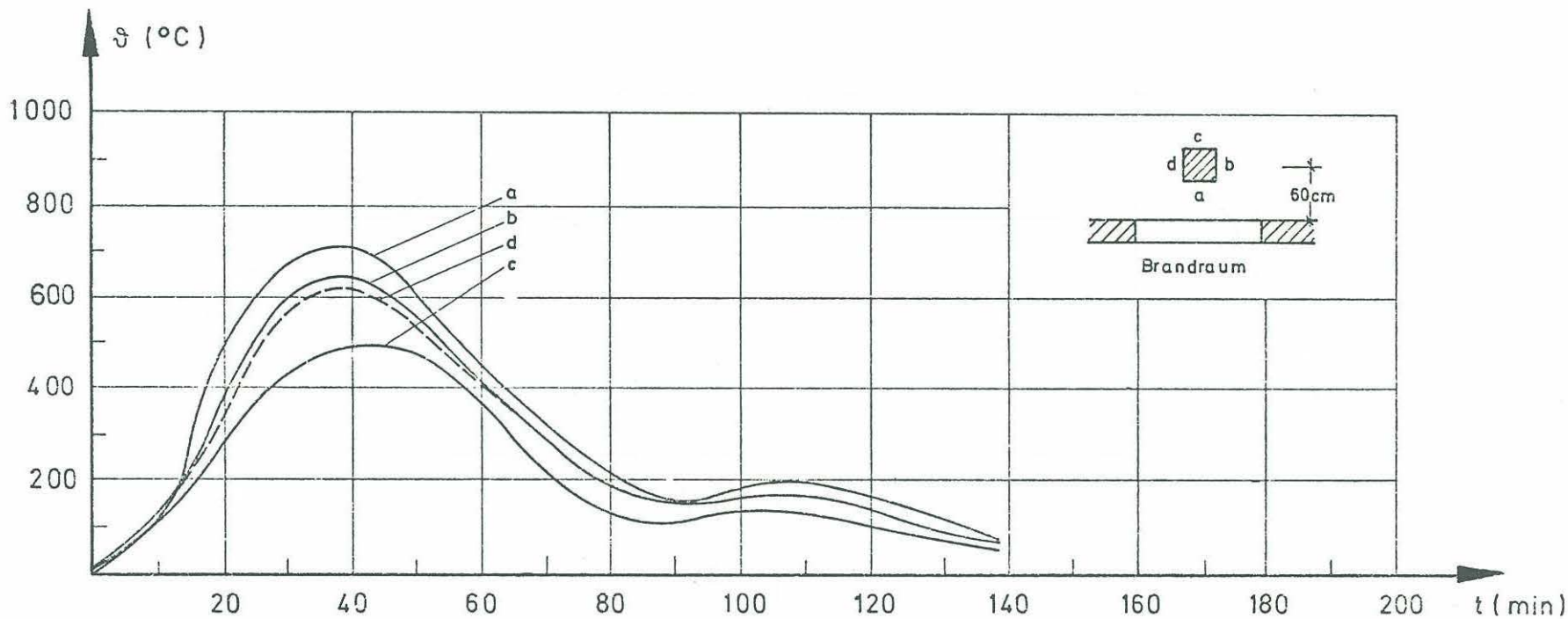
Änderung der Stützmomente der Decke zwischen Raum 1 und 3 bzw. 2 und 3

Anlage zum Versuch 4
Kap. 7.1 Nr. 5

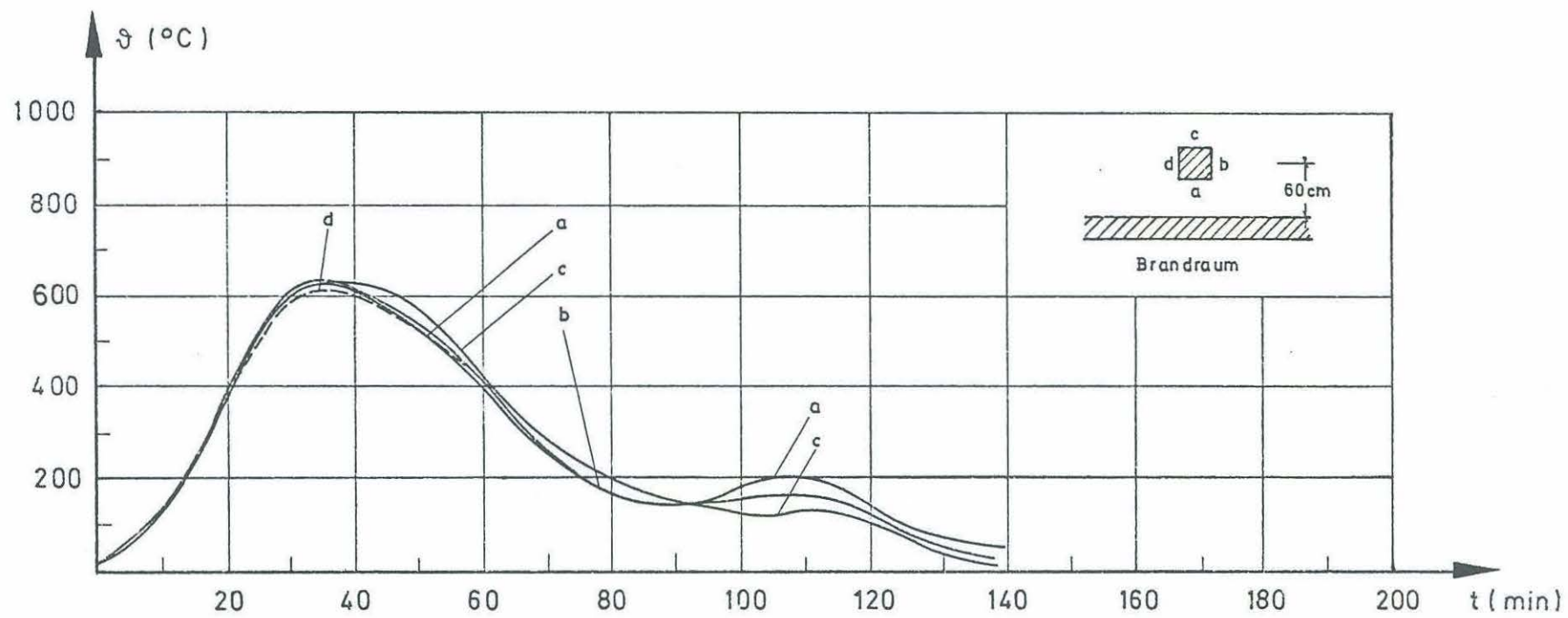


Lastabtragung auf 24 cm Wand zwischen Wohnung 2 und 1
und Brandraumtemperaturen in Wohnung 2

Anlage zum Versuch 4
Kap. 7.2 Nr. 1

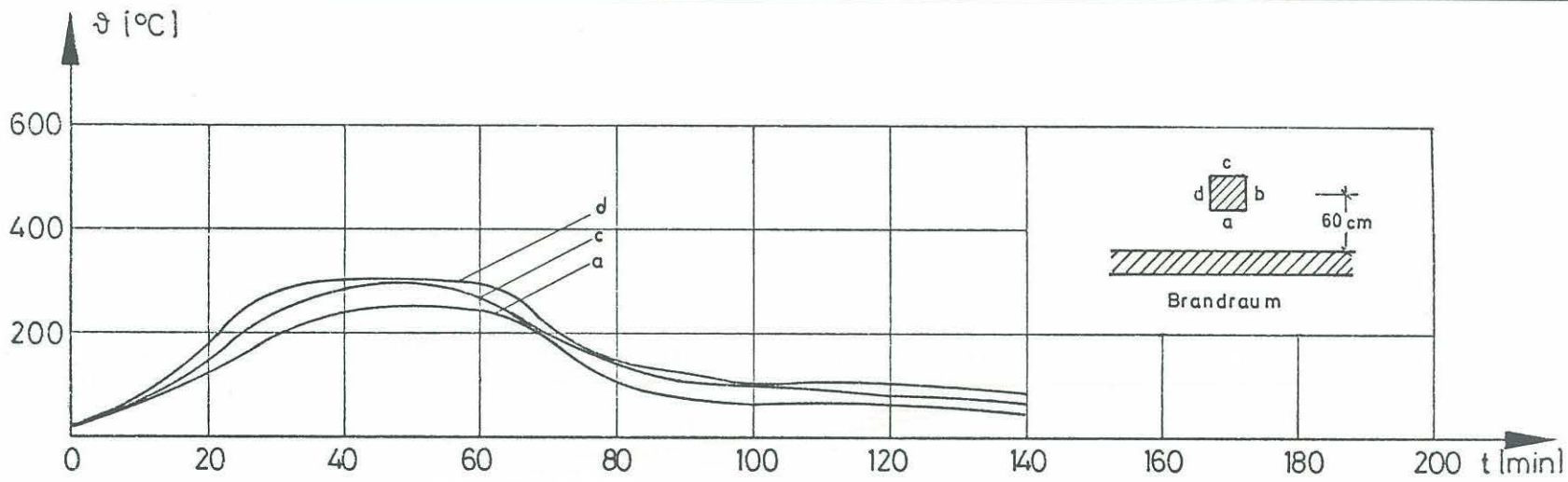


Höhe: 25 cm **unter** OK Fenster Brandraum 1
Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonstütze ($a = 24$ cm, $b = 24$ cm)

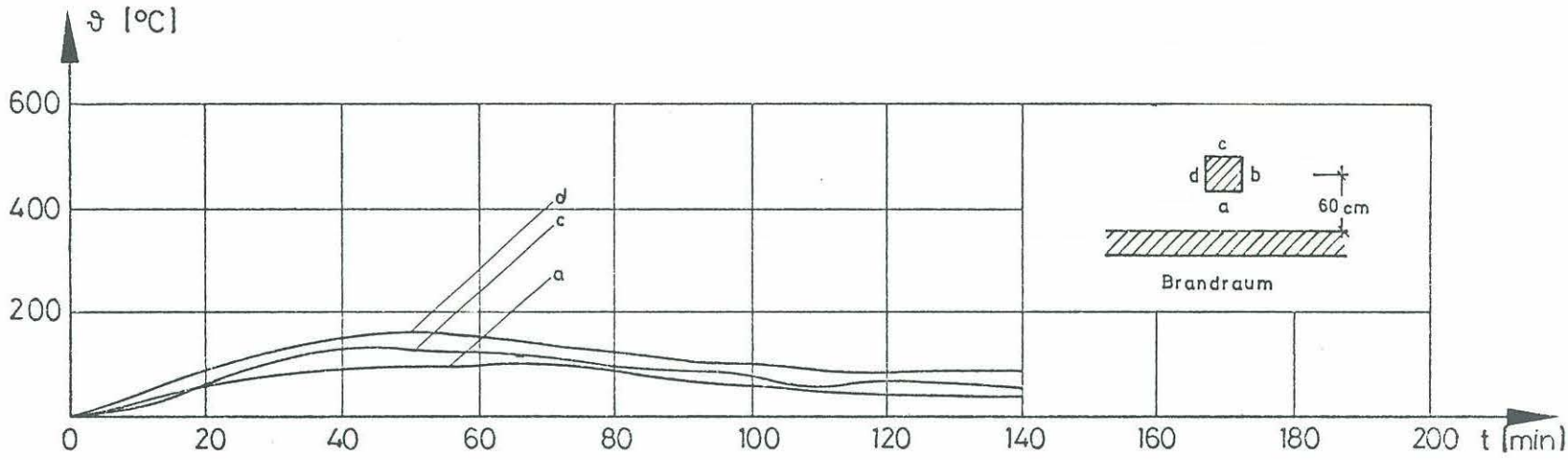


Höhe: 75 cm über OK Fenster Brandraum 1

Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonstütze ($a = 24$ cm, $b = 24$ cm)

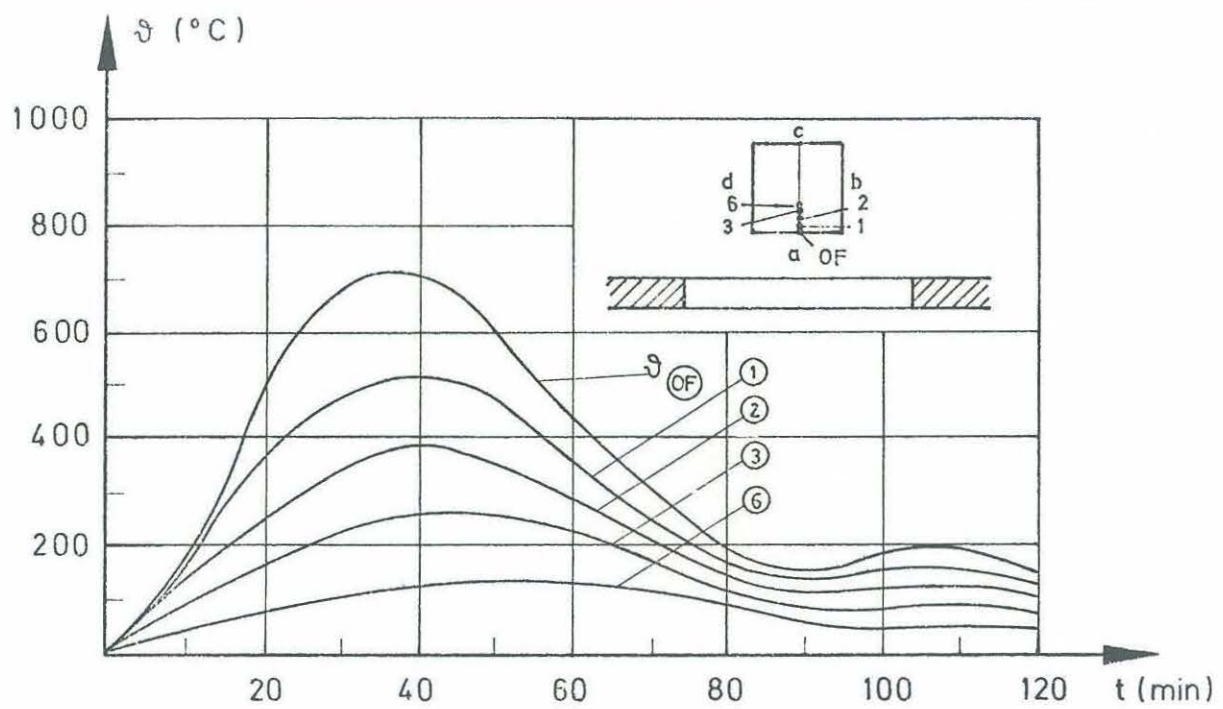


Höhe: 175 cm über OK Fenster Brandraum 1

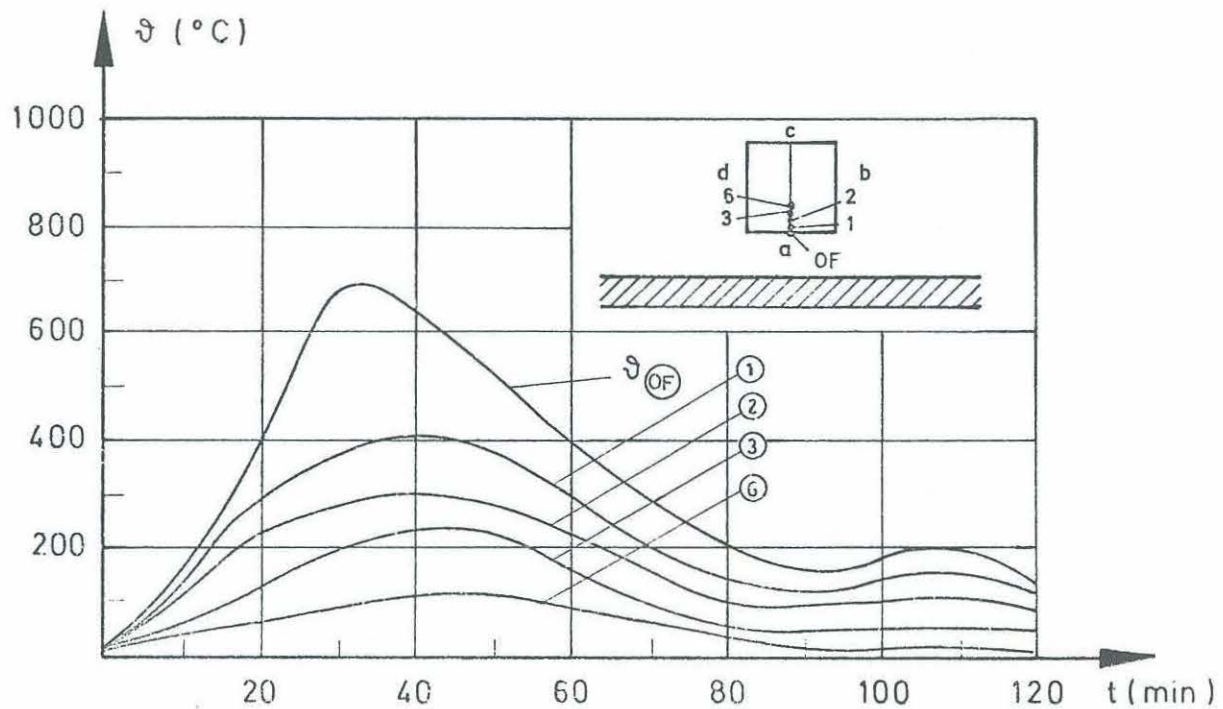


Höhe: 275 cm über OK Fenster Brandraum 1

Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonstütze (a = 24 cm, b = 24 cm)



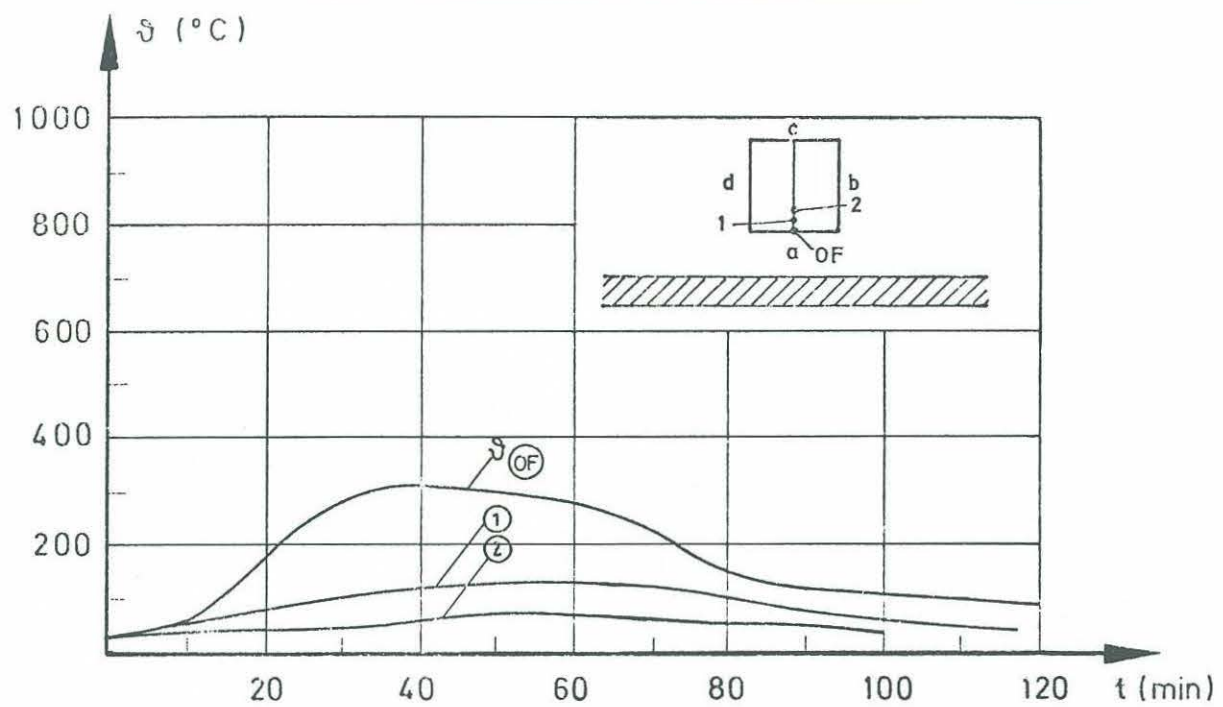
Höhe: 25 cm unter OK Fenster Brandraum 1



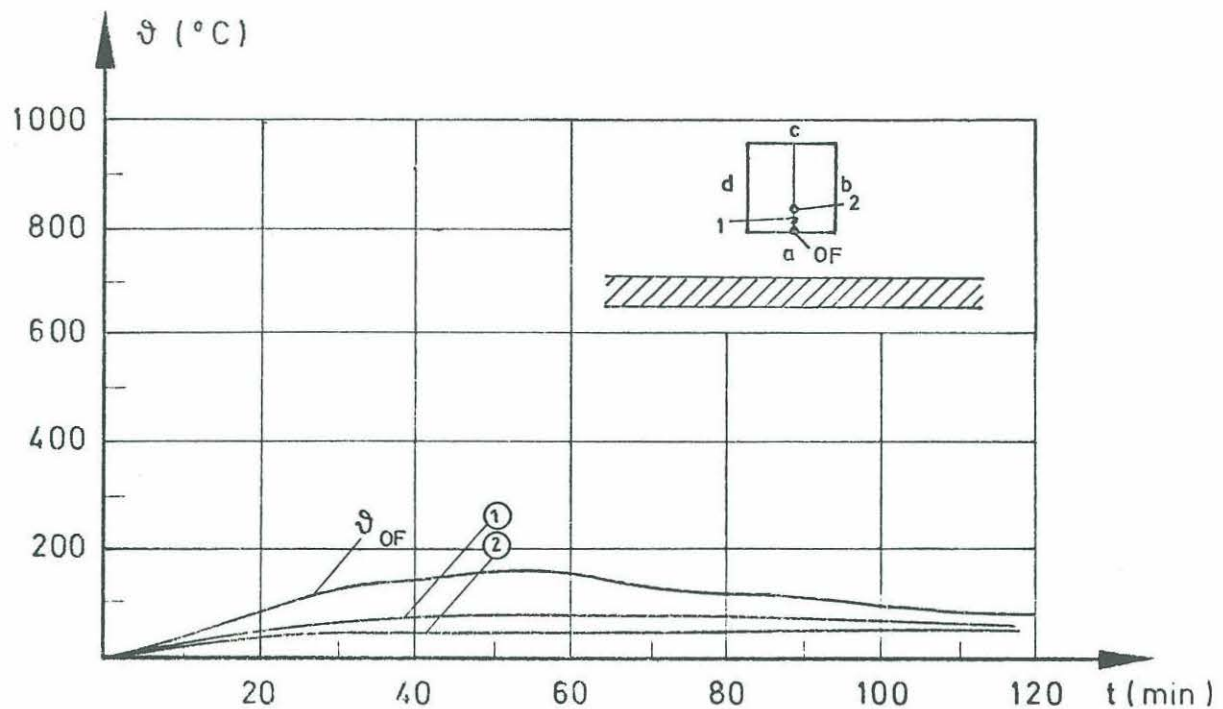
Höhe: 75 cm über OK Fenster Brandraum 1

Temperaturen in verschiedenen Punkten im Querschnitt der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch 4
Kap. 8.4 Nr. 4



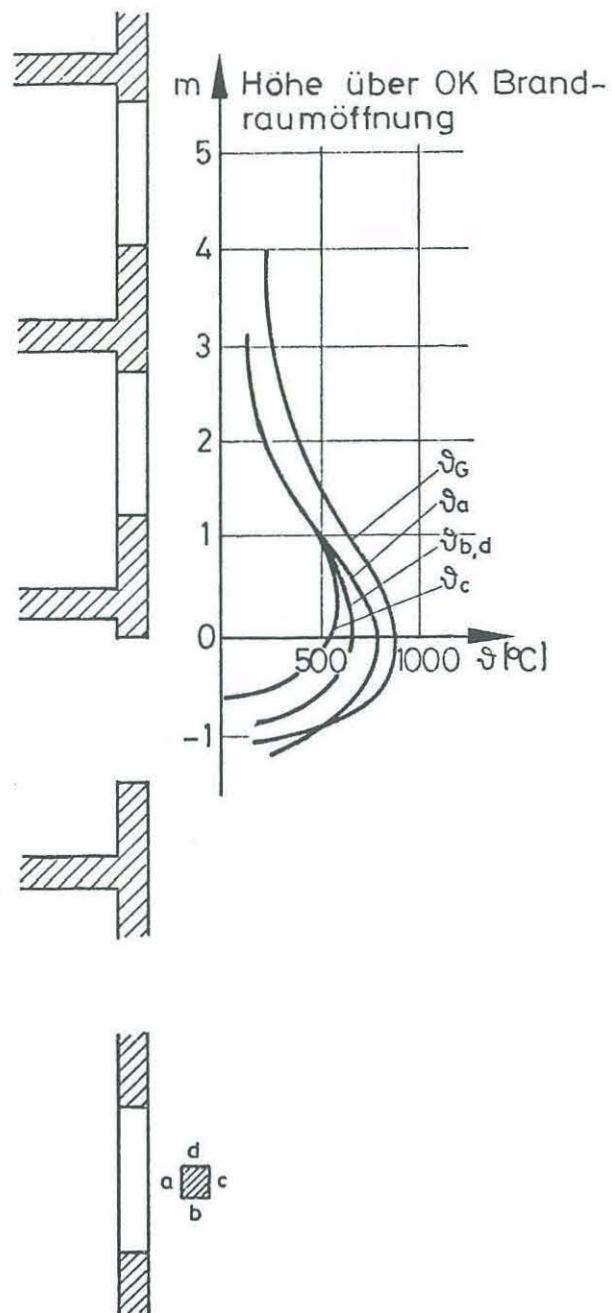
Höhe: 175 cm über OK Fenster Brandraum 1



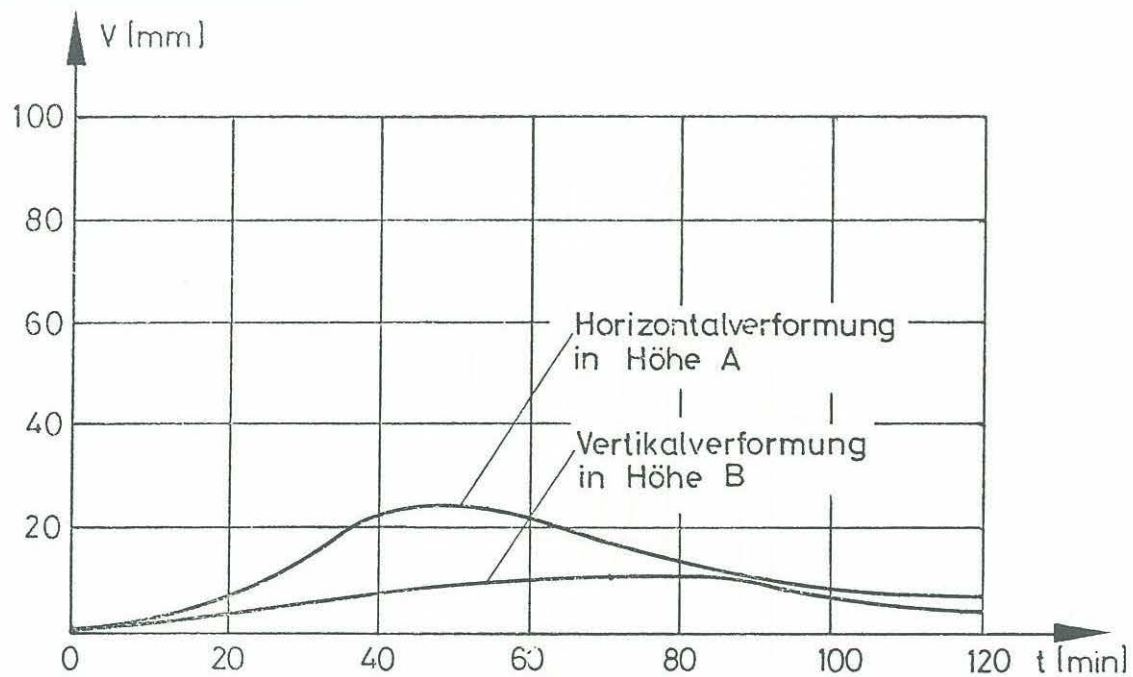
Höhe: 275 cm über OK Fenster Brandraum 1

Temperaturen in verschiedenen Querschnitten der Stahlbetonaußenstütze

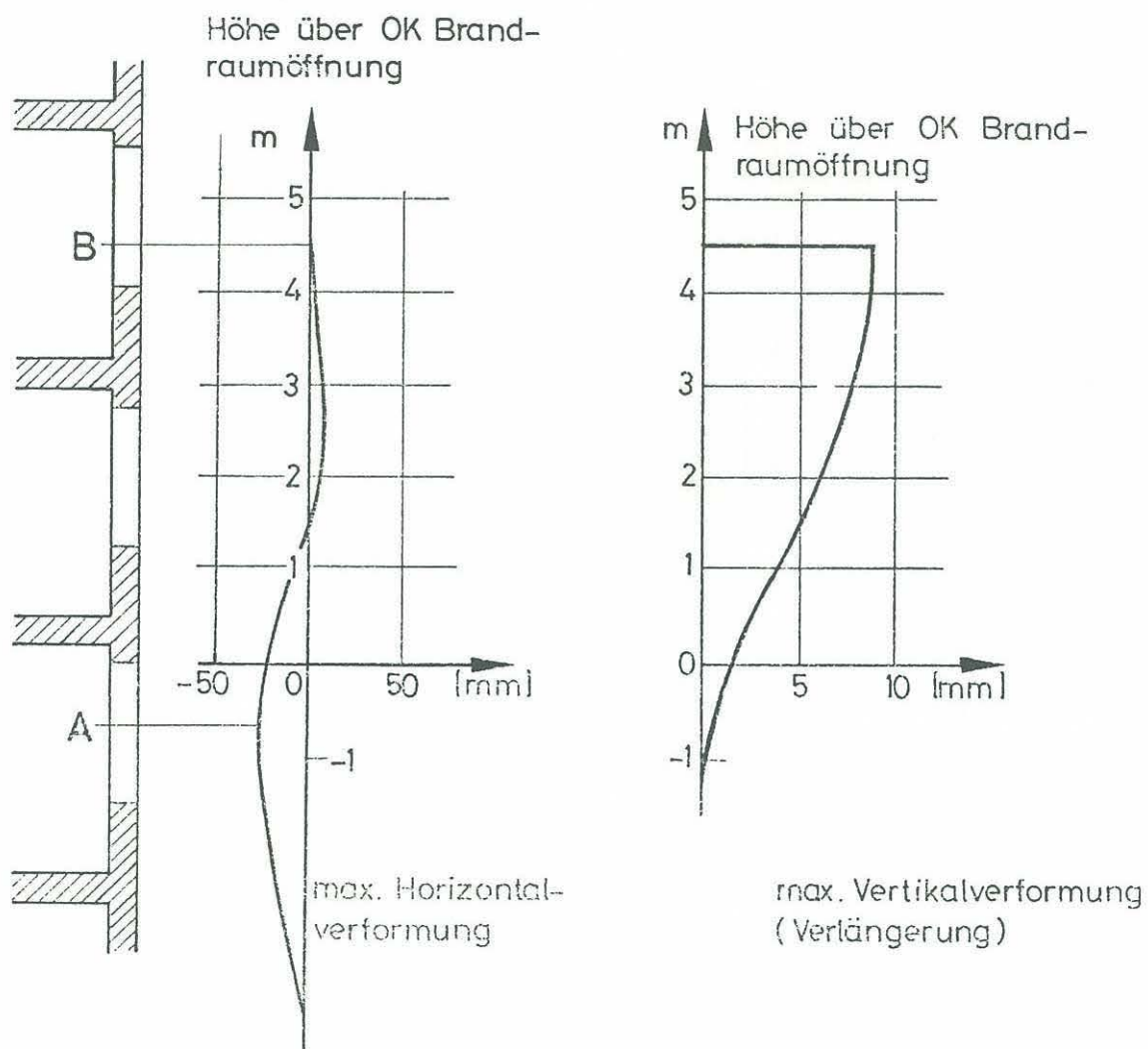
Anlage zum Versuch 4
Kap. 8.4 Nr. 5



Maximale Heißgastemperatur ϑ_g und maximale Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonaußenstützen

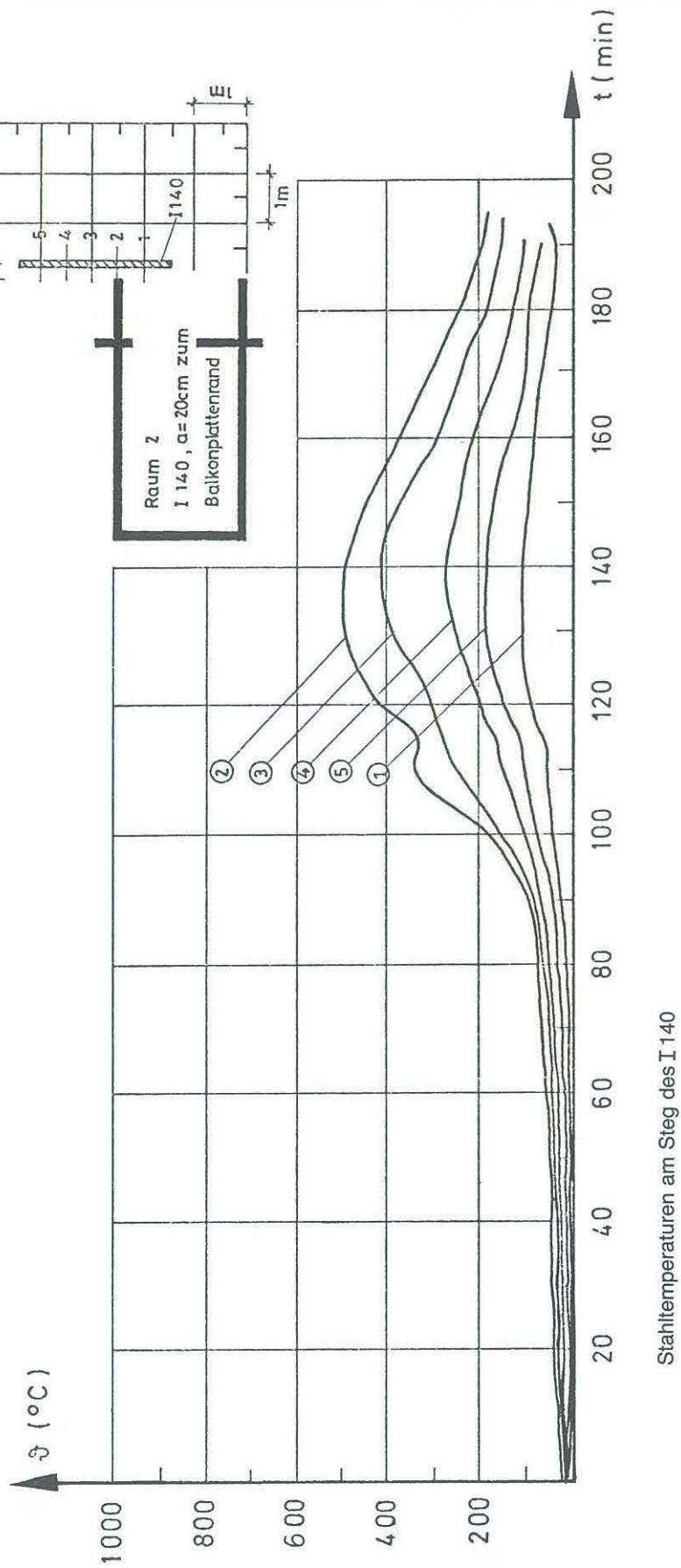


Zeit – Verformungslinien in Höhe der Punkte A und B

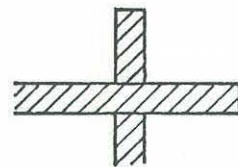
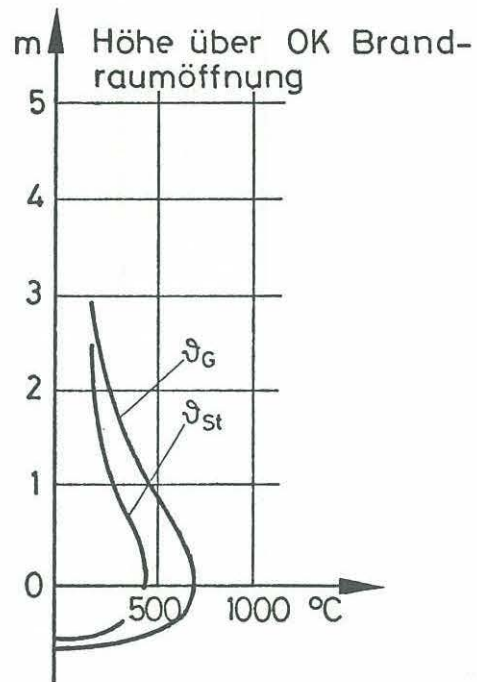
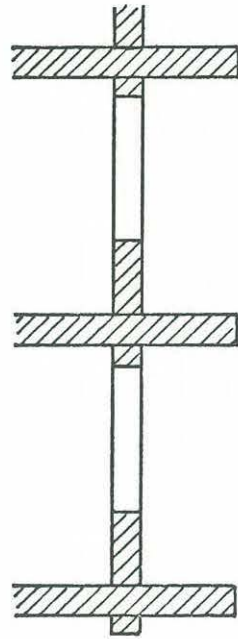


Verformungen der Stahlbetonstütze

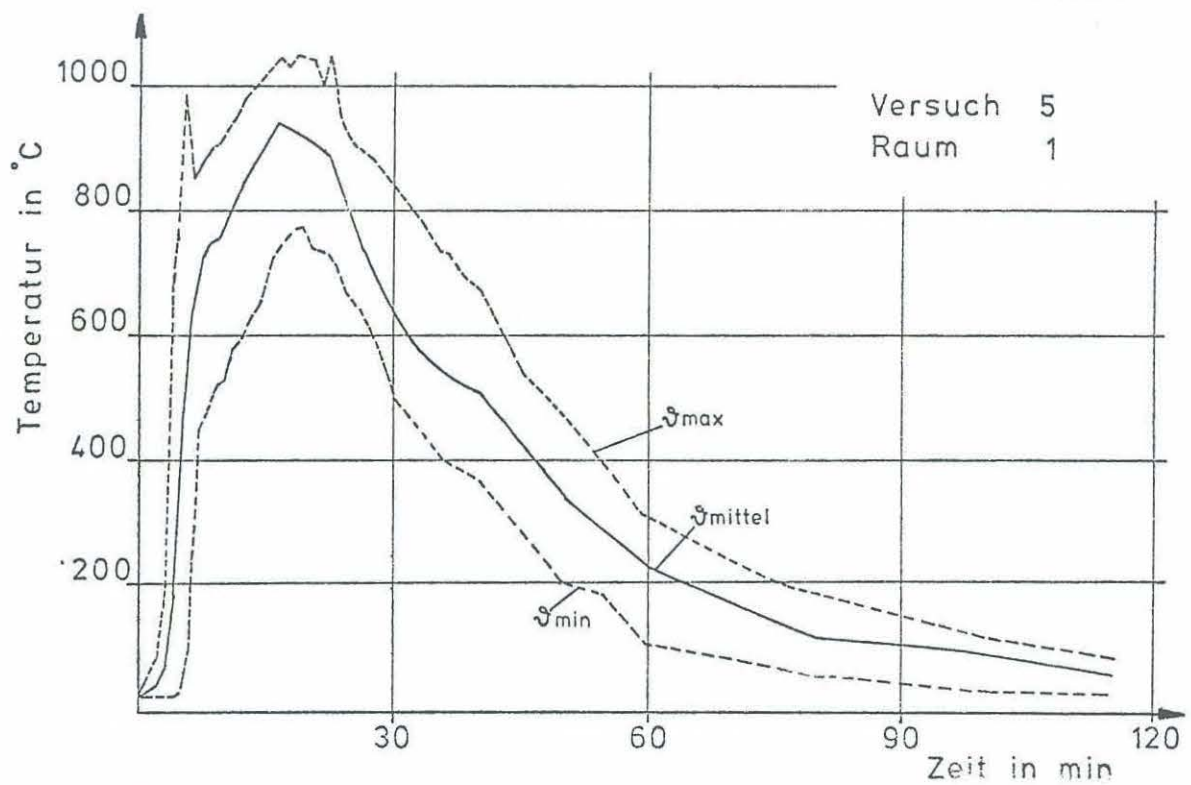
Anlage zum Versuch 4
Kap. 8.4 Nr. 7



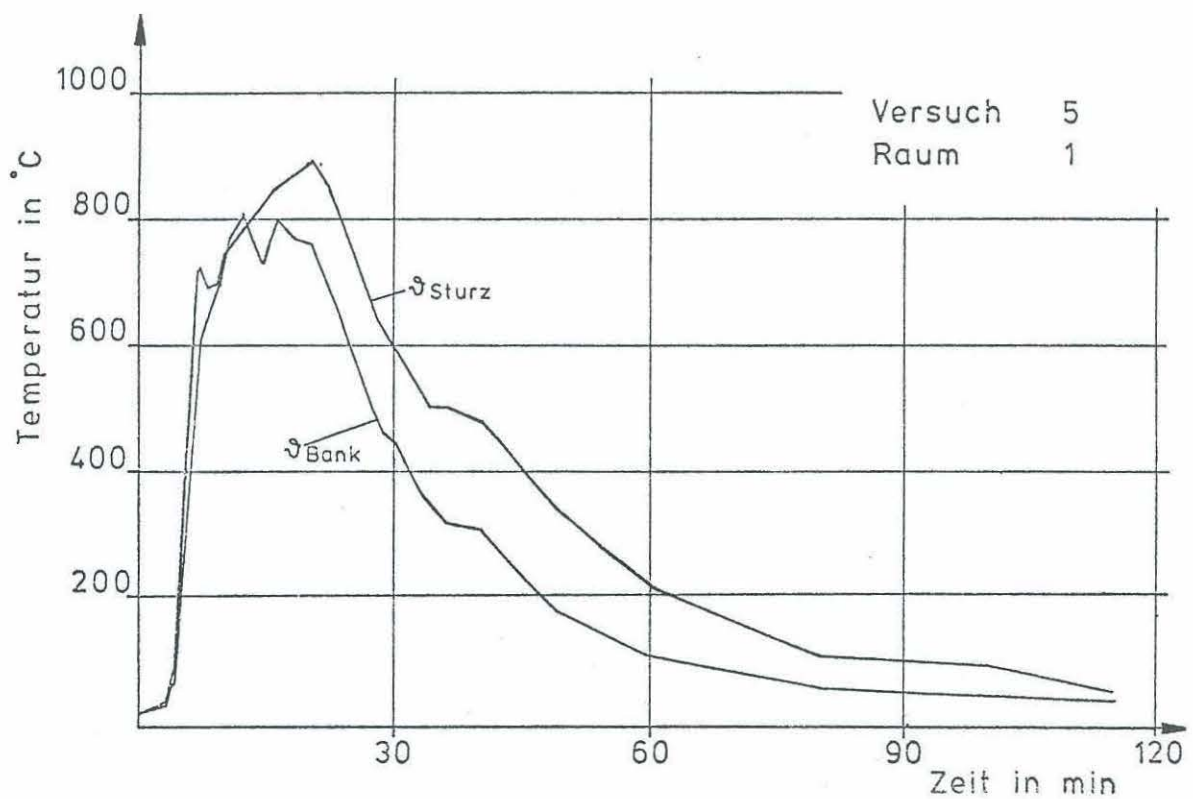
Anlage zum Versuch 4
 Kap. 8.4 Nr. 8



Maximale Heißgastemperatur ϑ_G und maximale Stahltemperatur ϑ_{St} am I 140

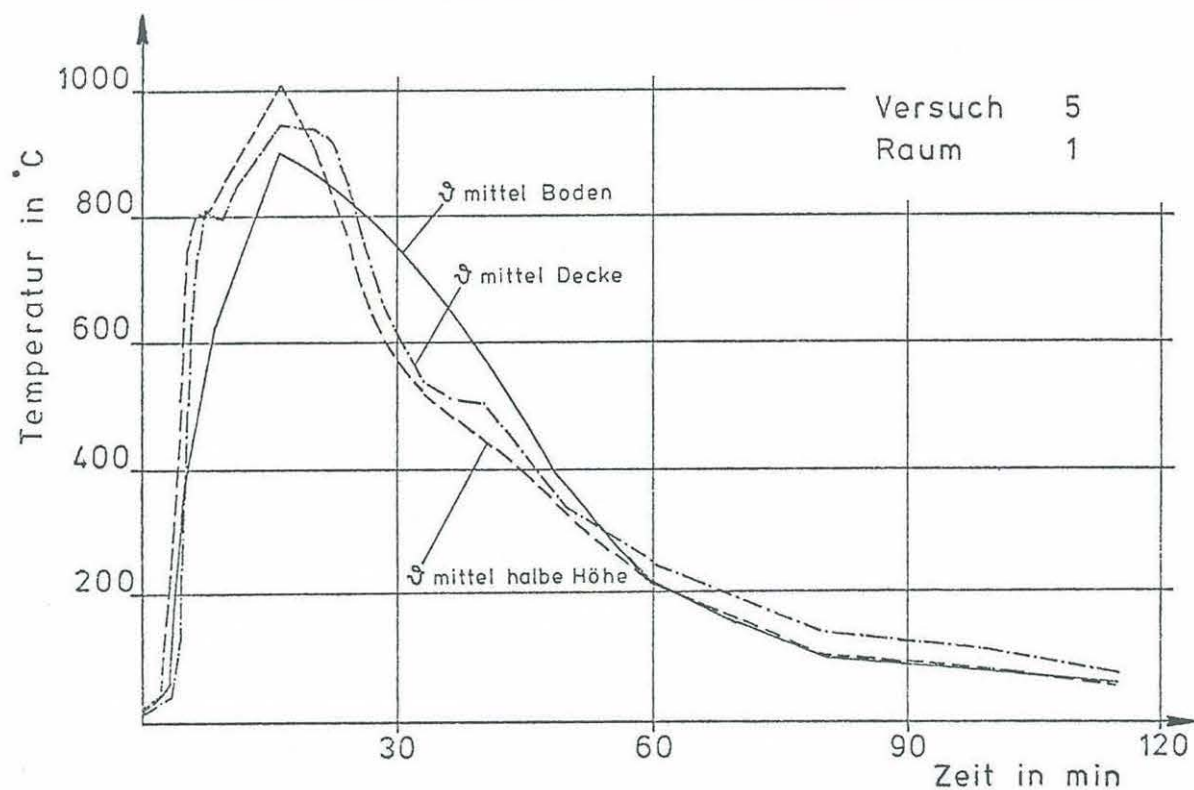


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

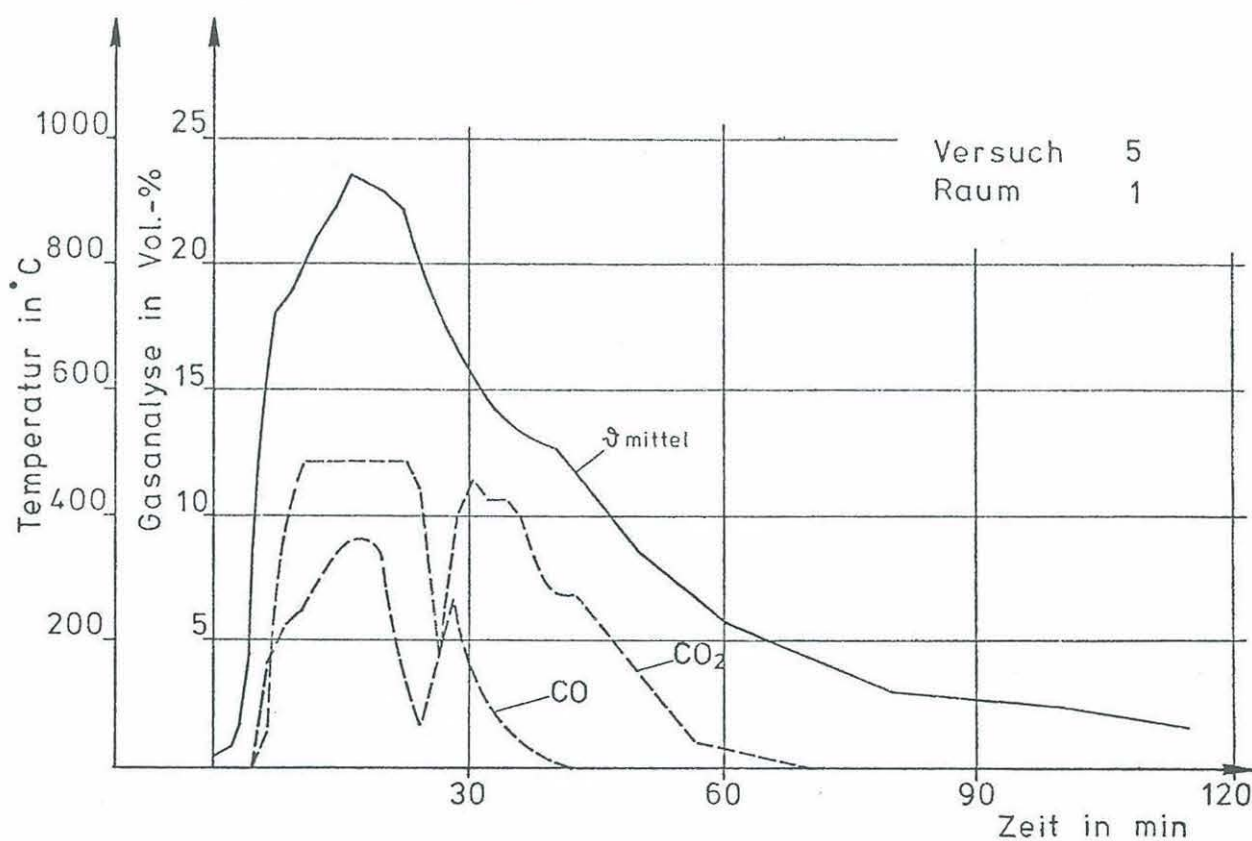


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2

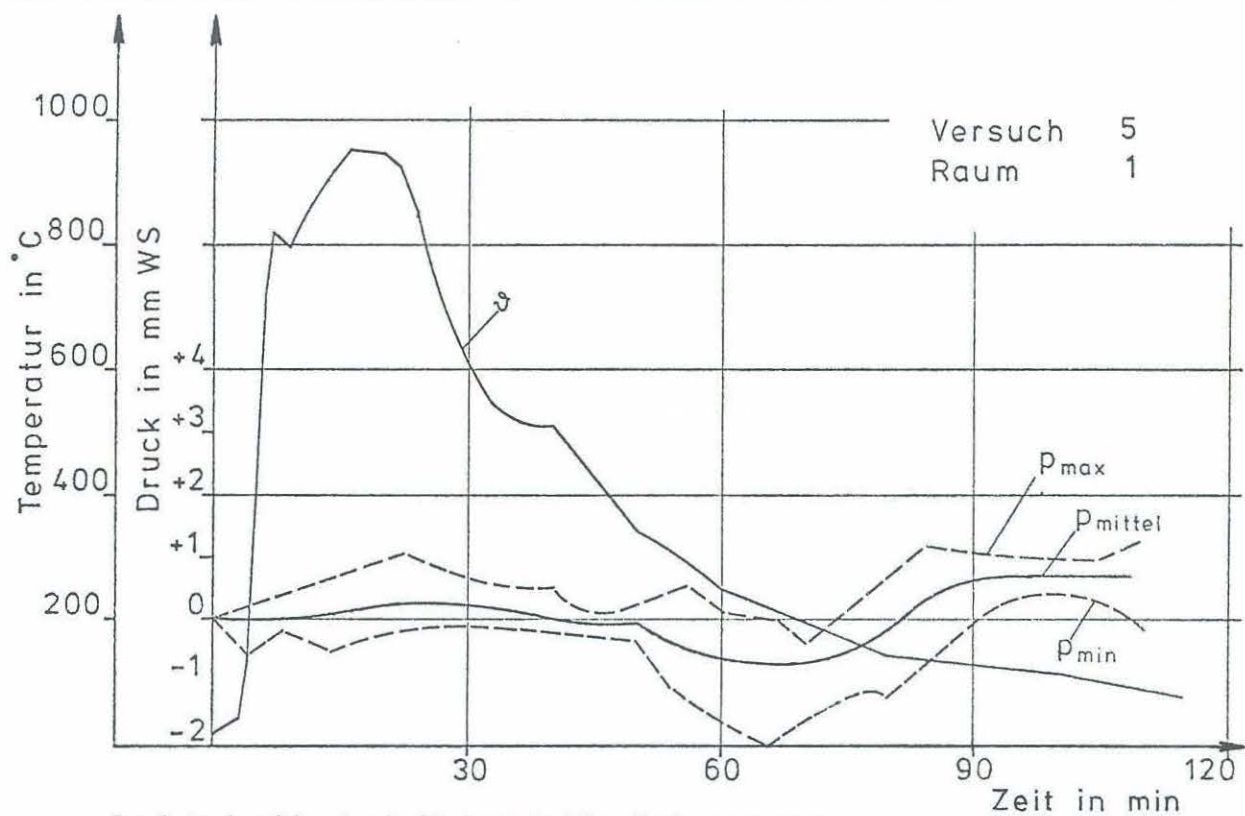


Temperaturschichtung gemessen in drei horizontalen Ebenen

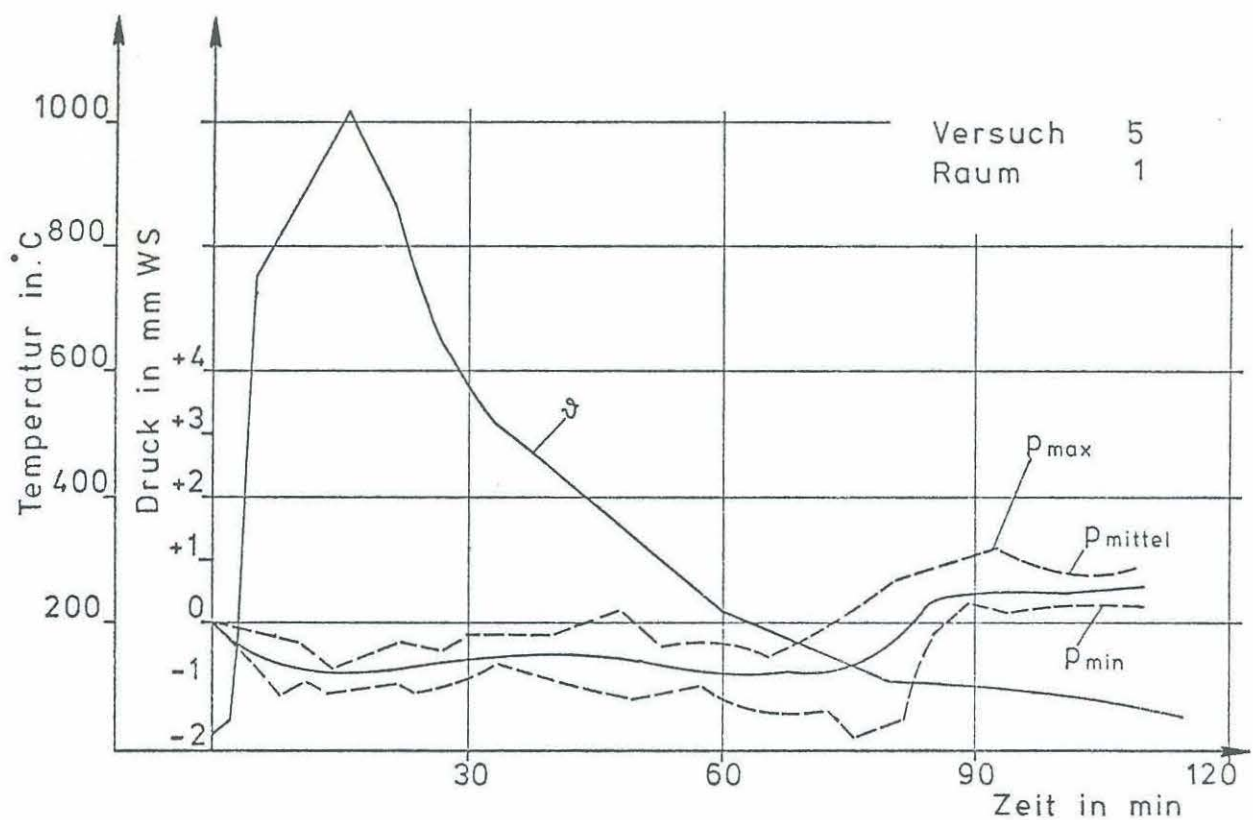


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4

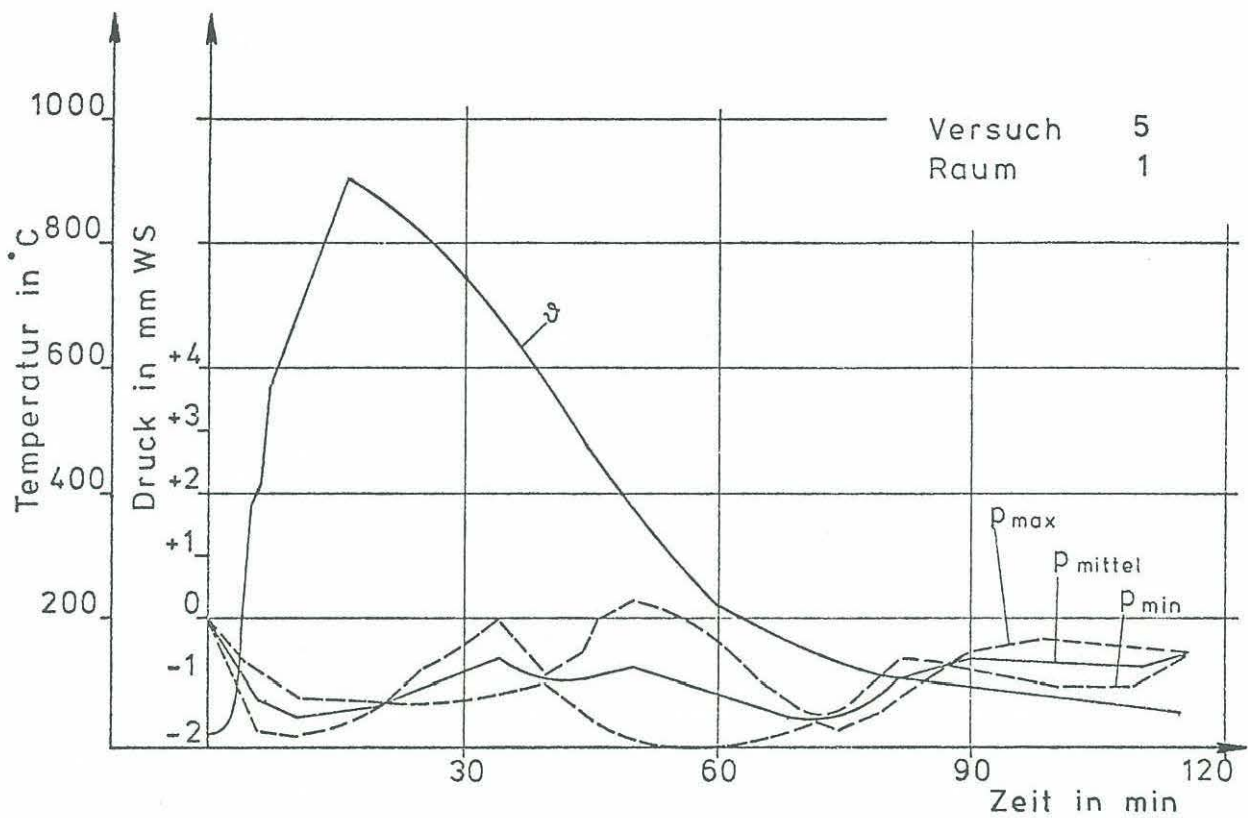


Druckstreubereich unter der Decke und mittlere Deckentemperatur



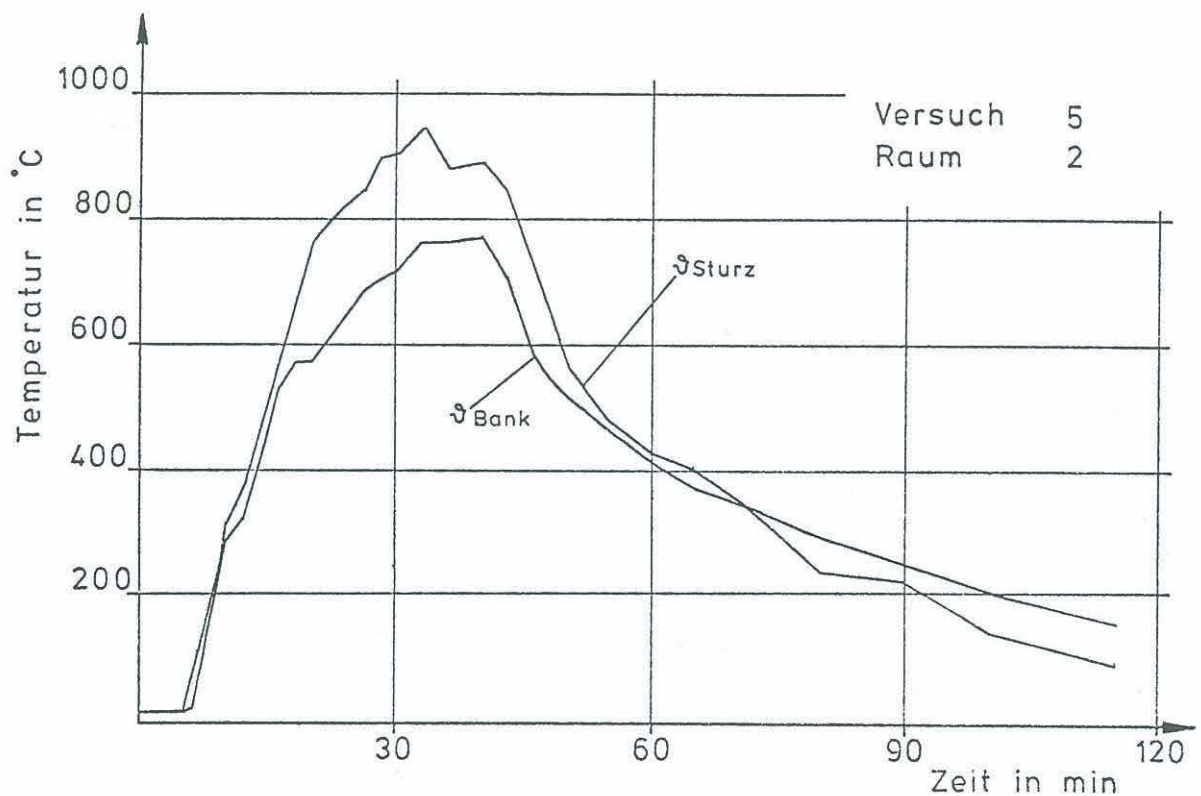
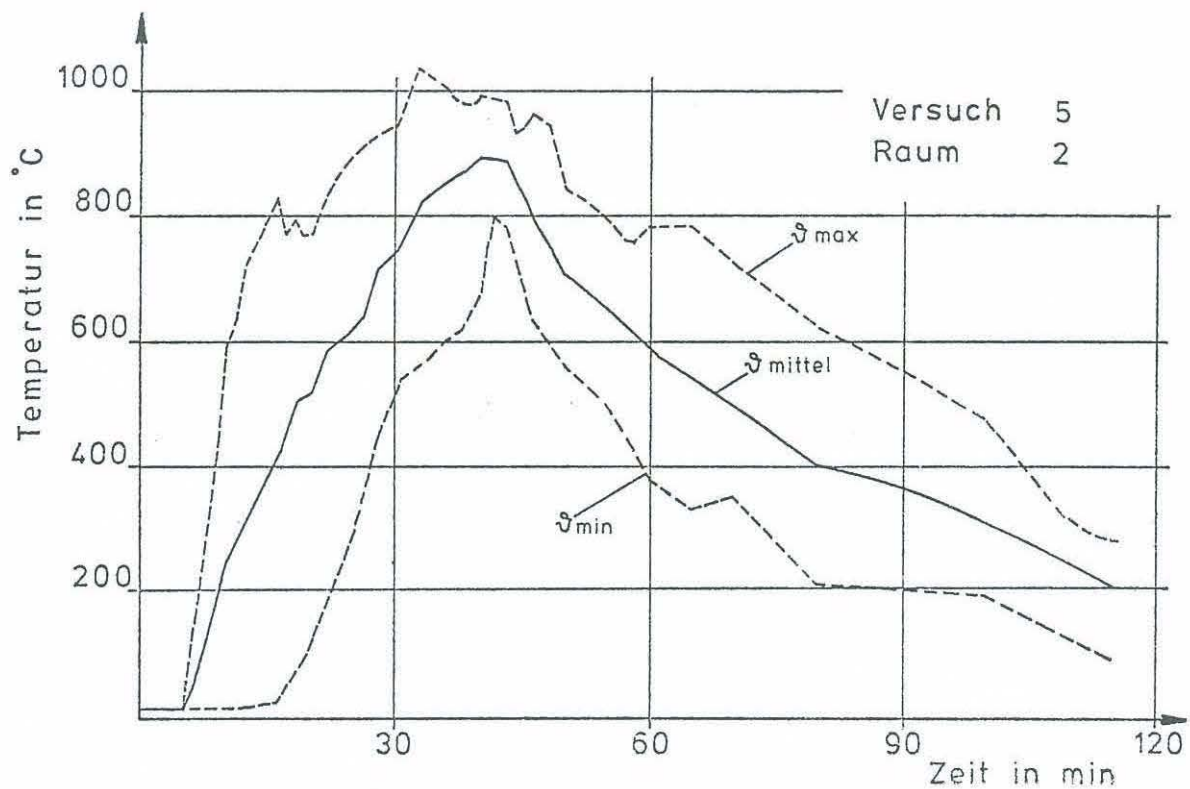
Druckstreubereich in halber Raumhöhe und mittlere Temperatur in halber Raumhöhe

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 5
Kap. 6.1 Nr. 6

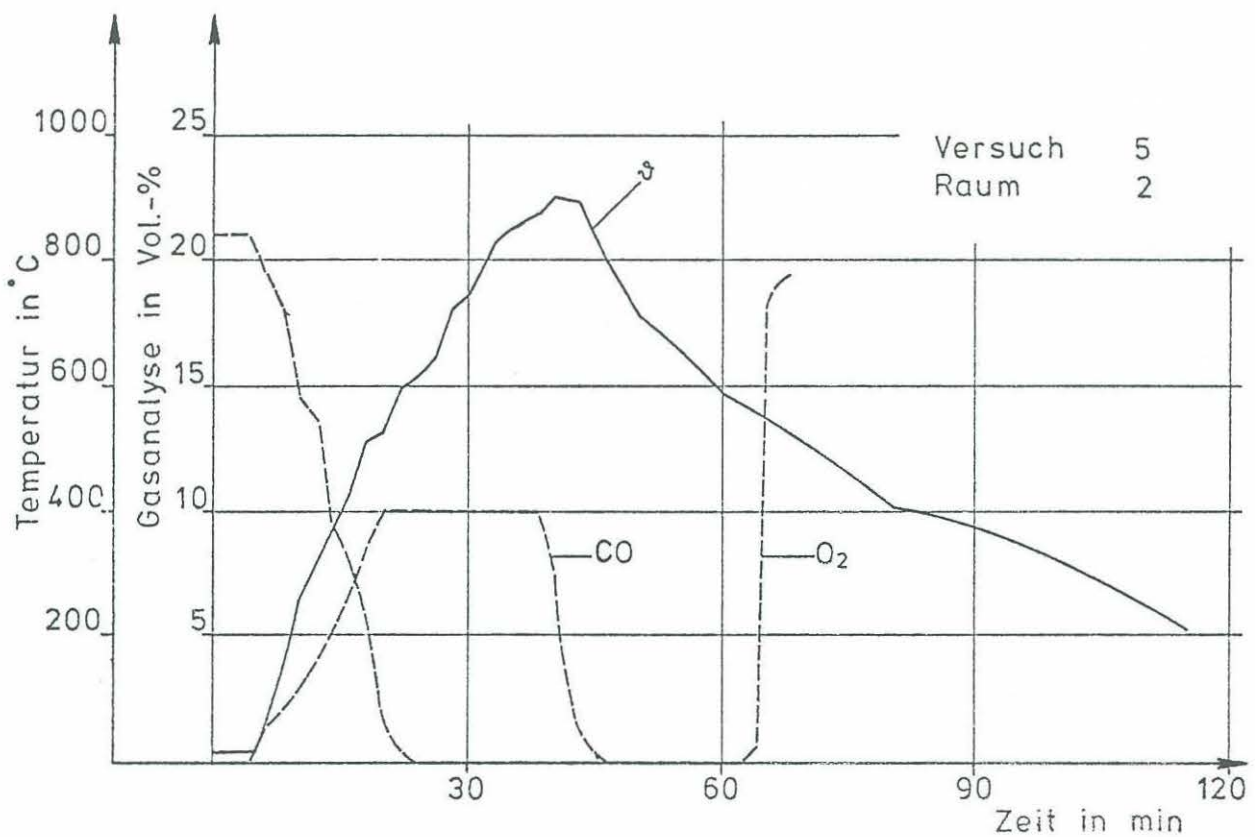
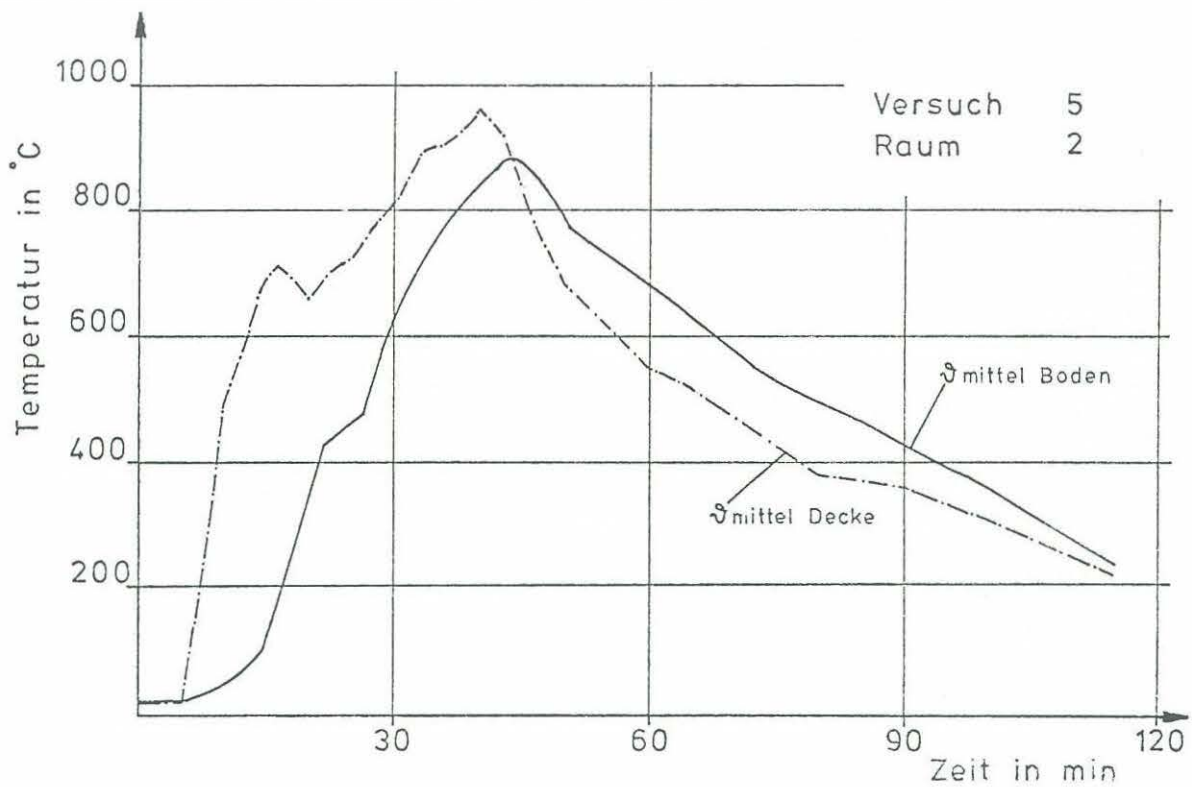


Druckstreibereich am Boden und mittlere Temperatur am Boden

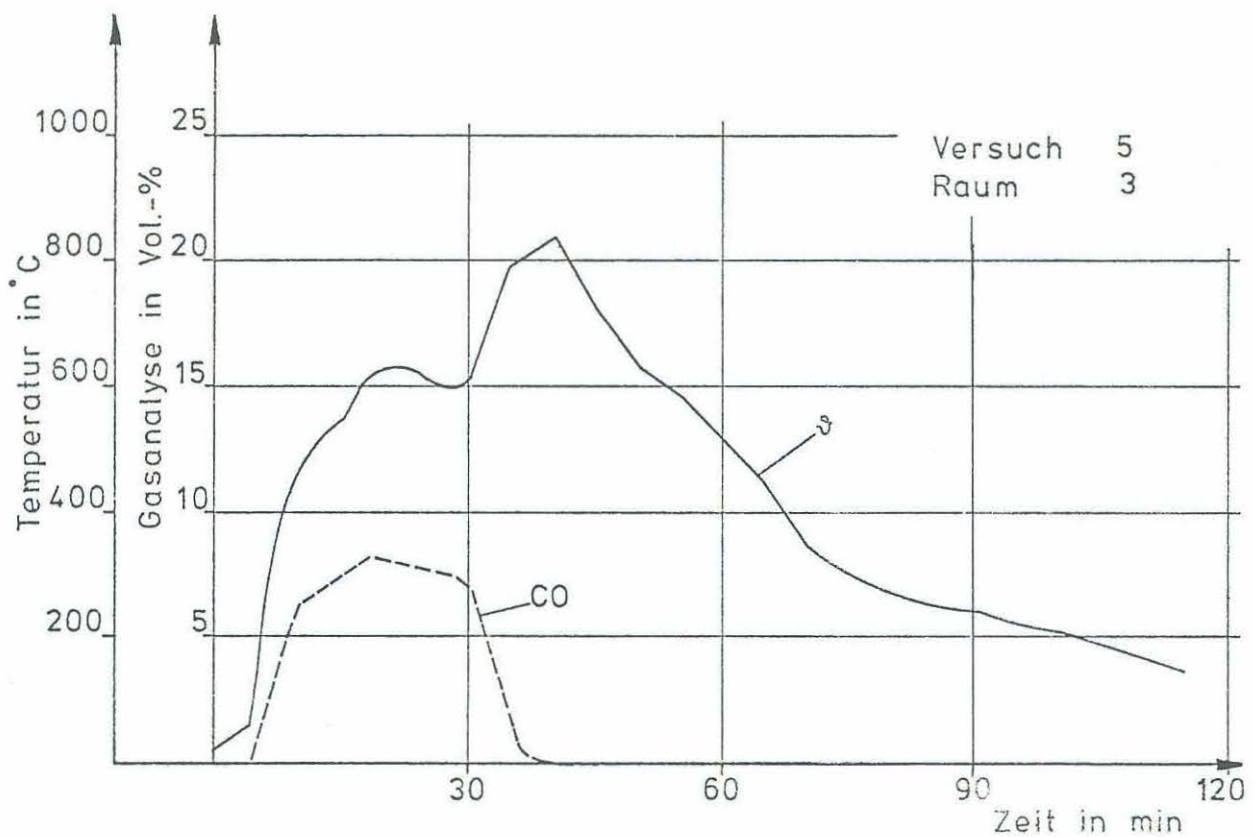
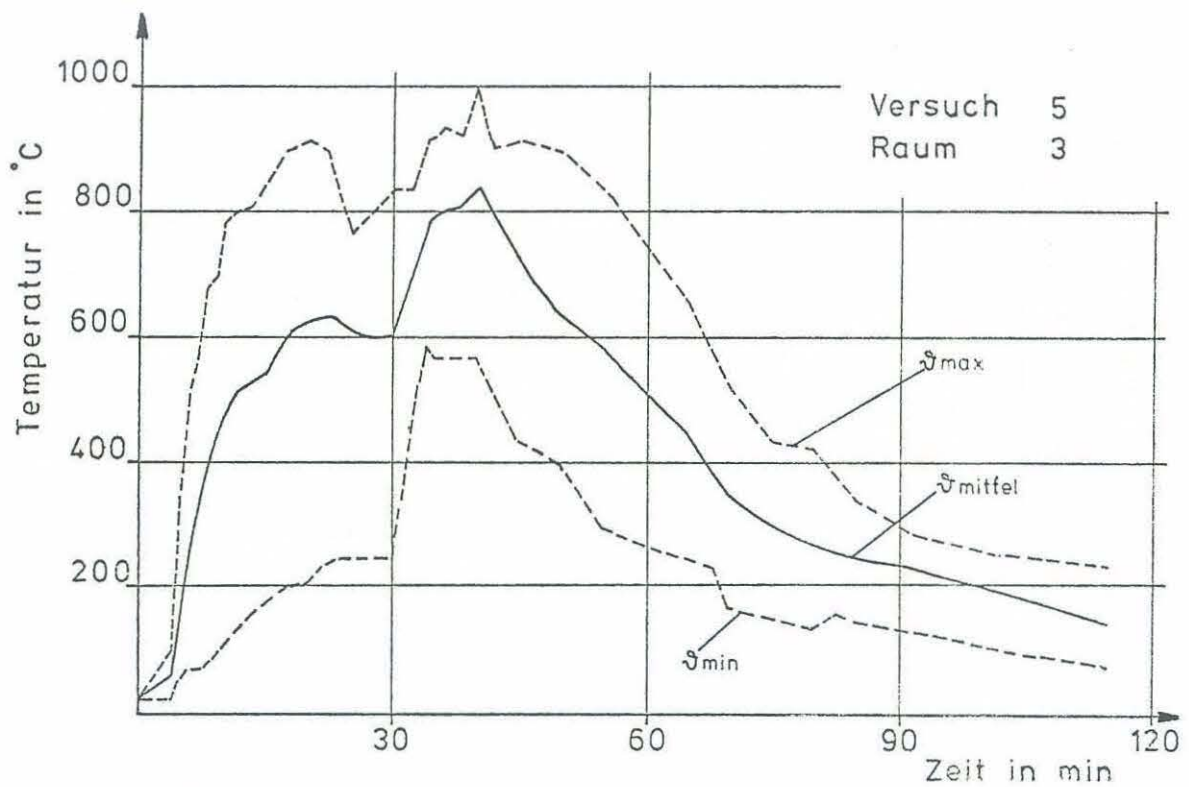
Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 7



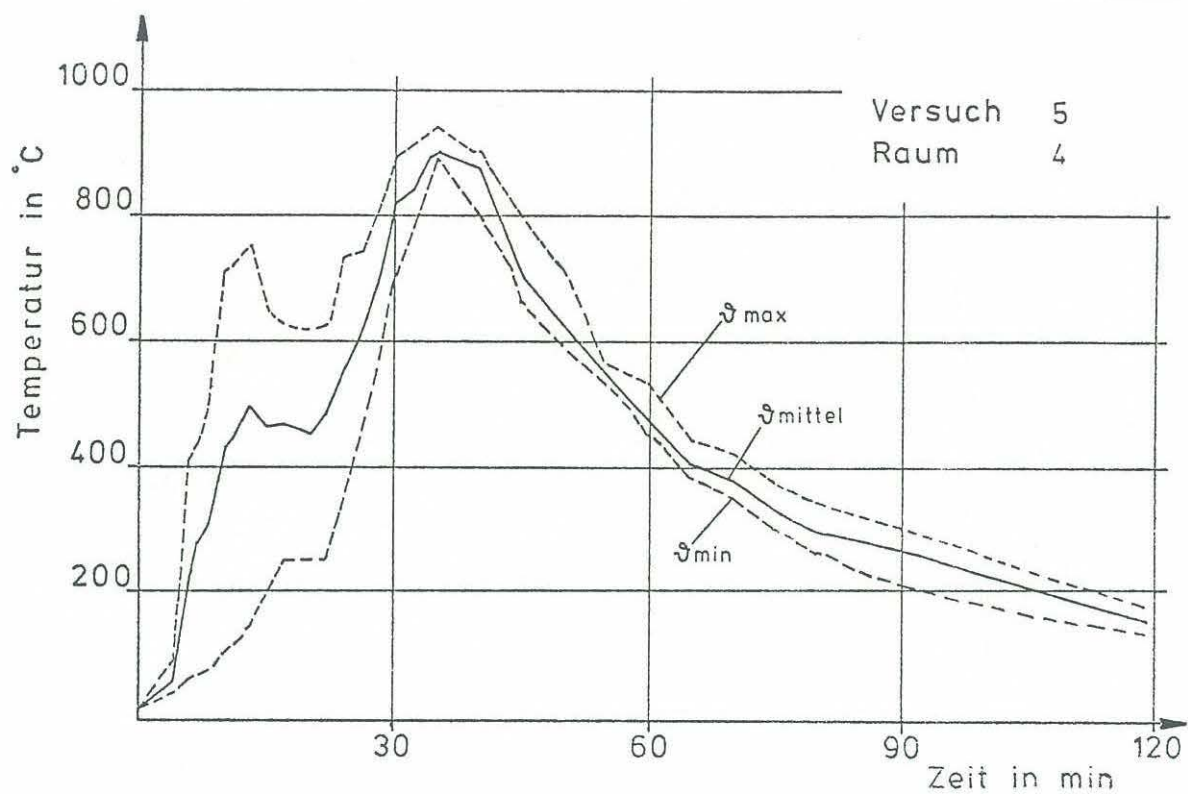
Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 8
Kap. 6.1 Nr. 9



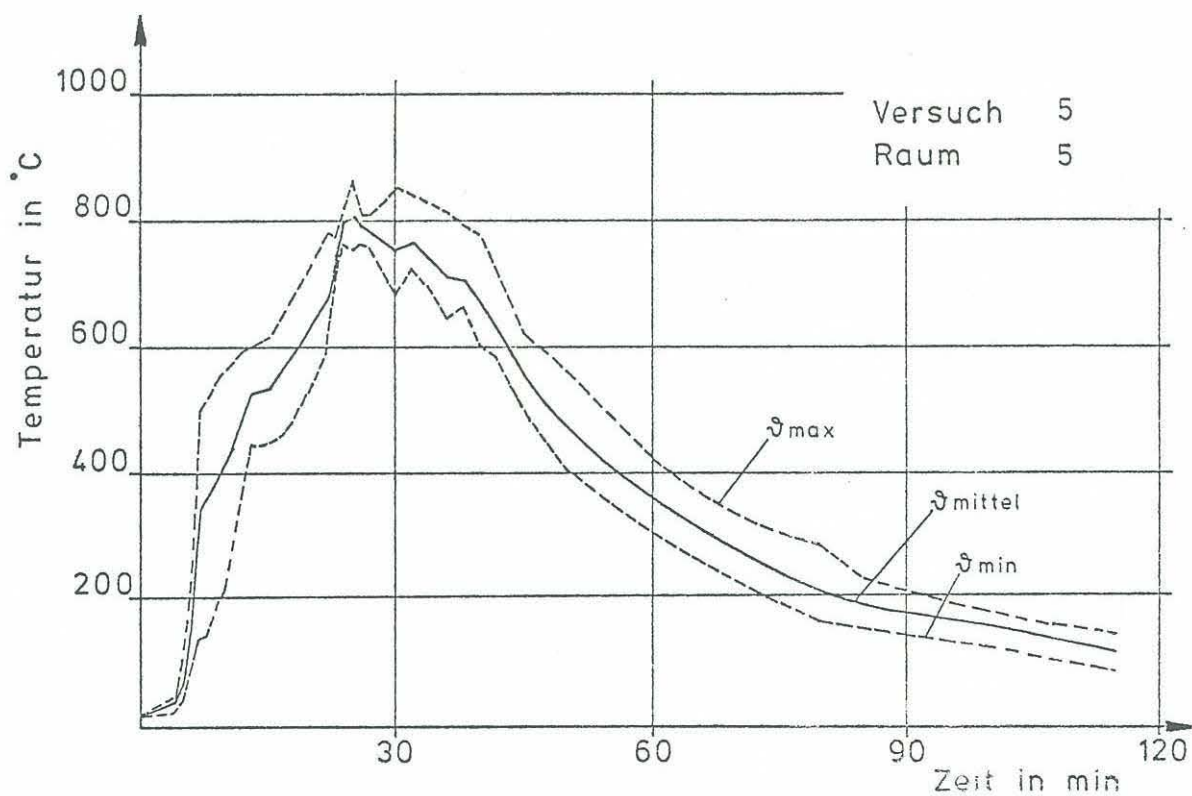
Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 10
Kap. 6.1 Nr. 11



Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 12
Kap. 6.1 Nr. 13

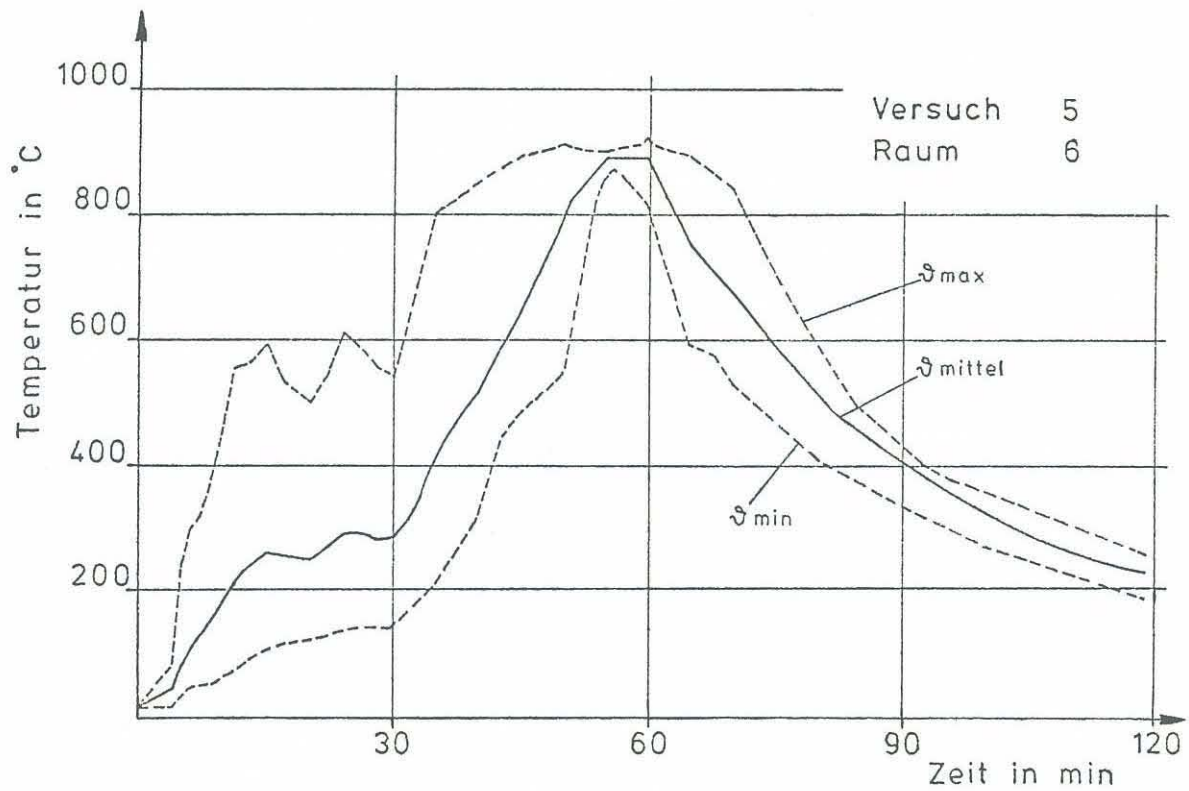


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

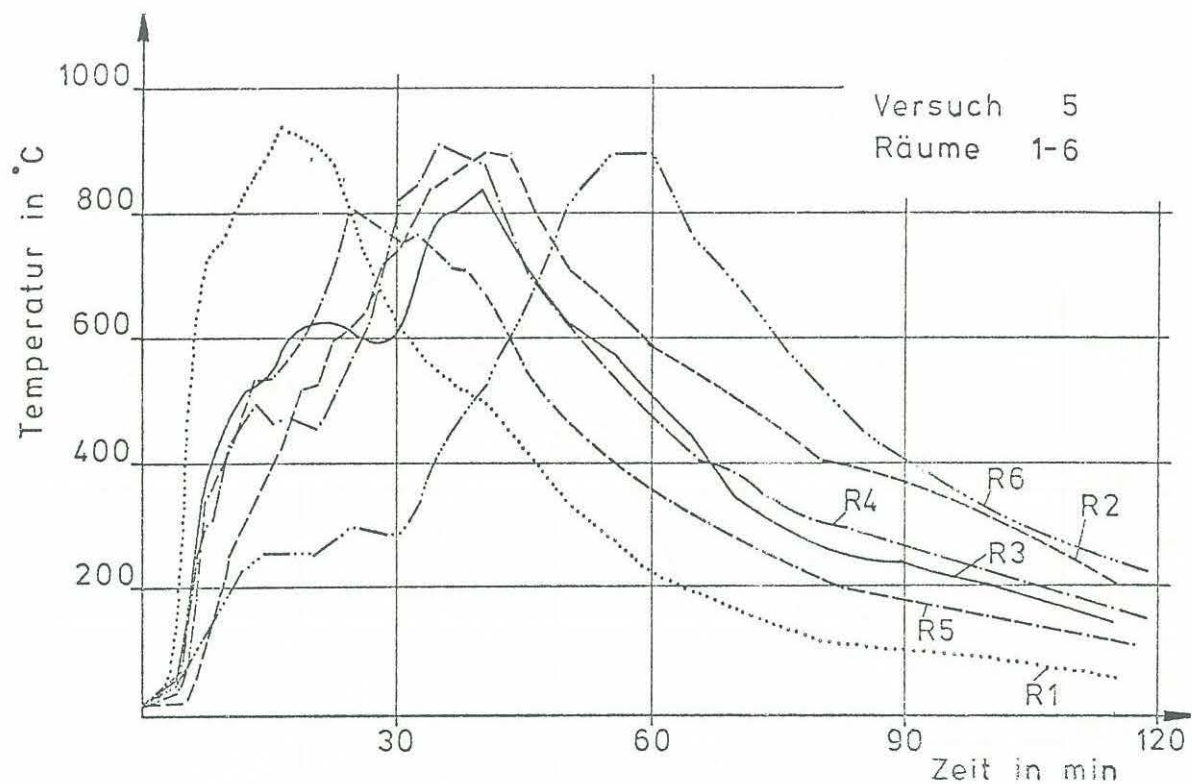


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

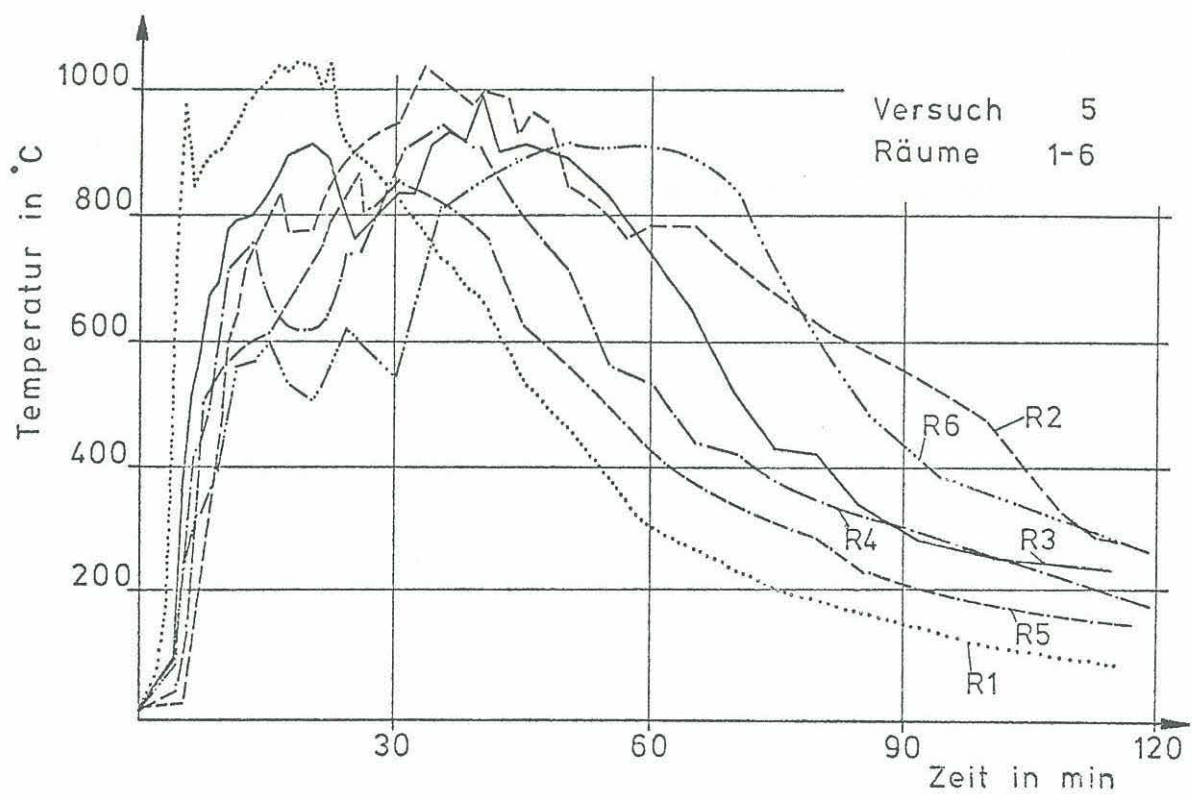
Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 14
Kap. 6.1 Nr. 15



Temperaturstreibereich in einem Brandraum

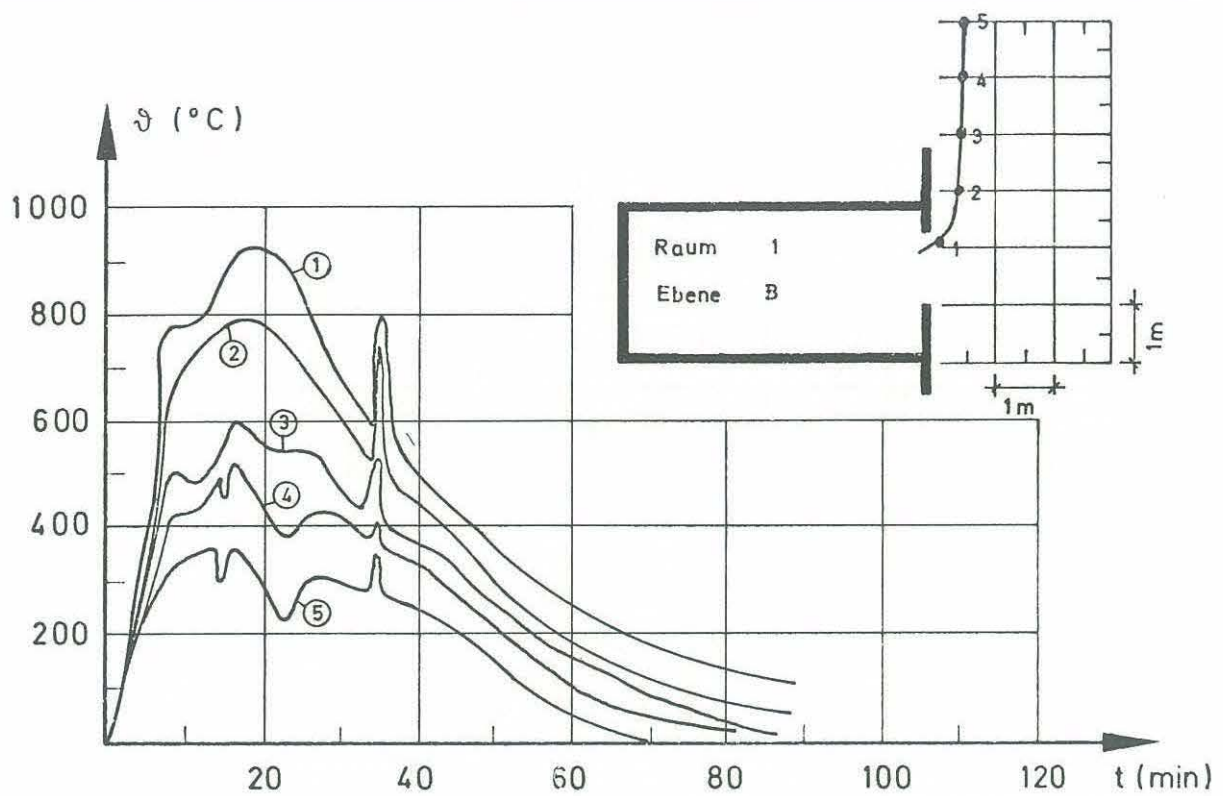


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

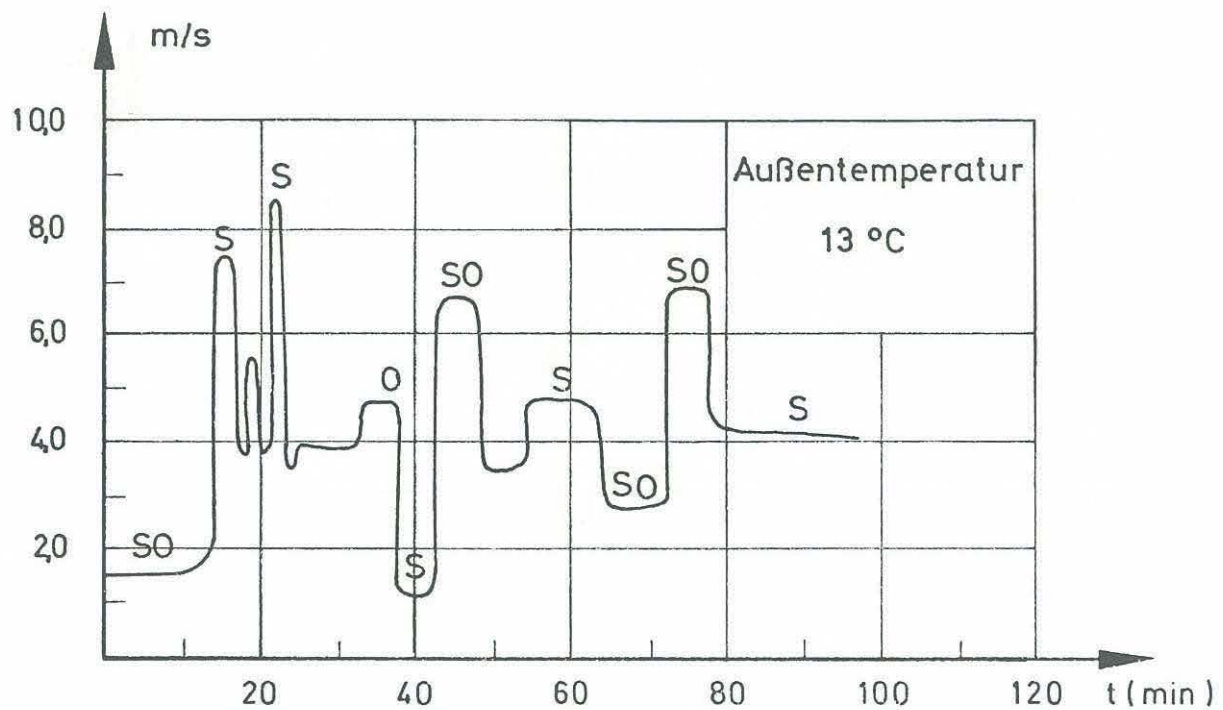


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (maximale Brandraumtemperaturen)

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.1 Nr. 17
Kap. 6.1 Nr. 18

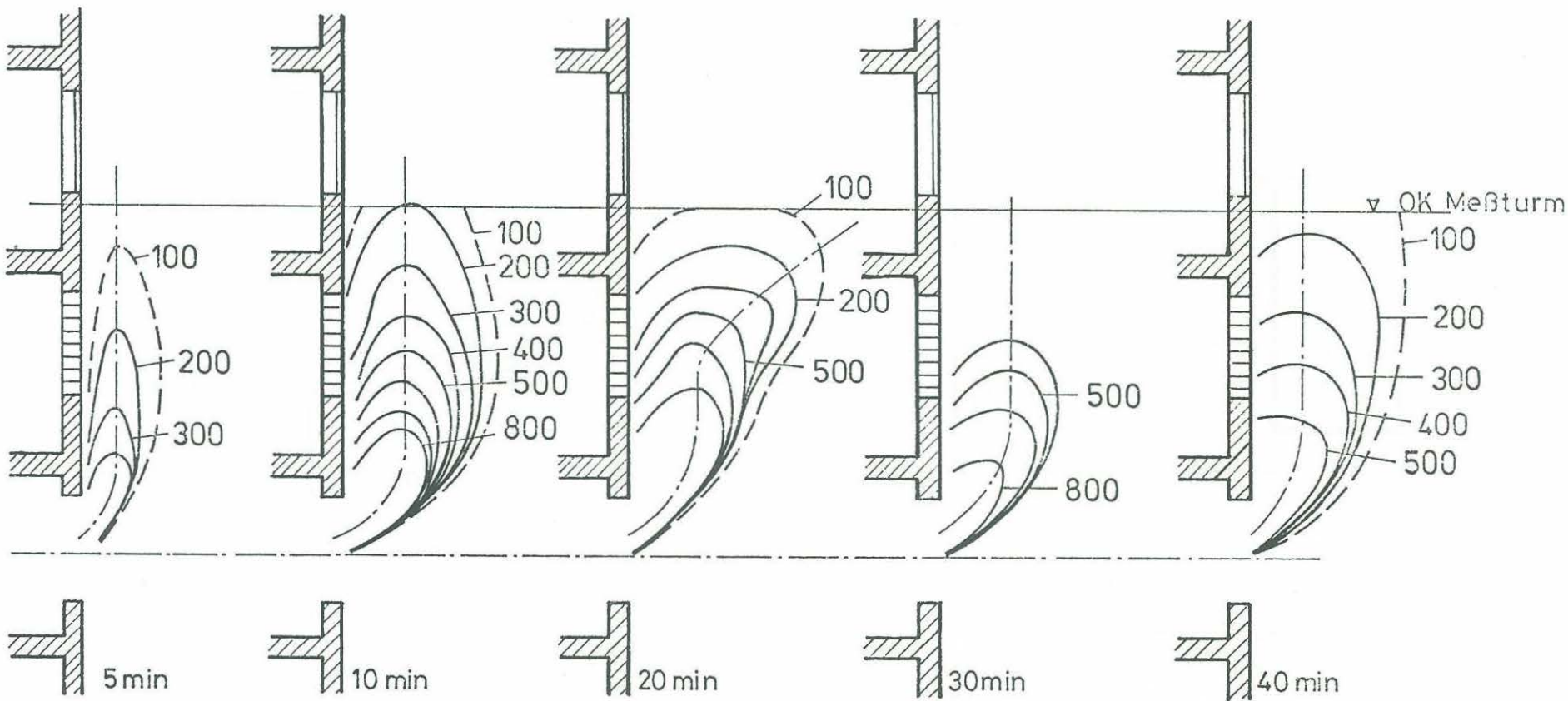


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene B)



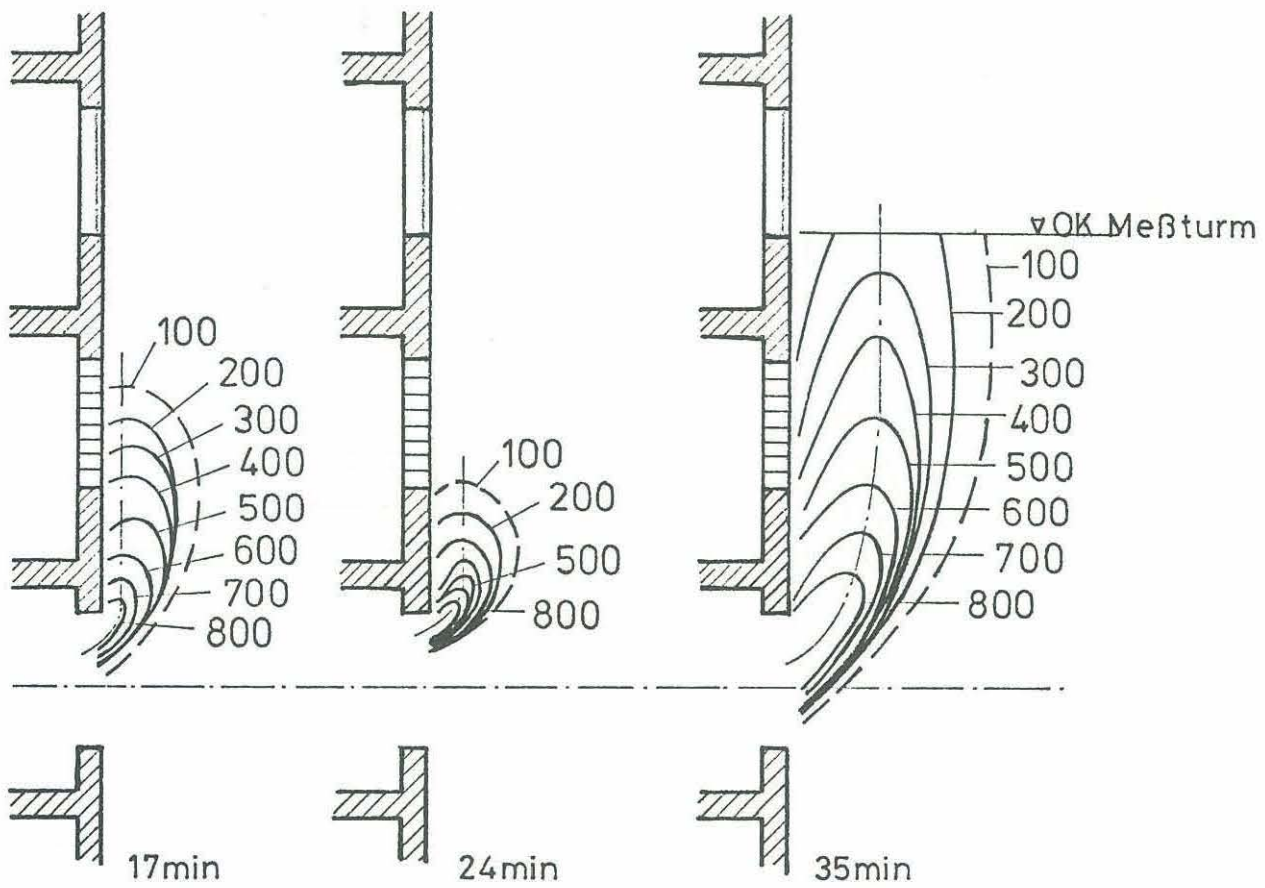
Windgeschwindigkeit und -richtung

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.2 Nr. 1

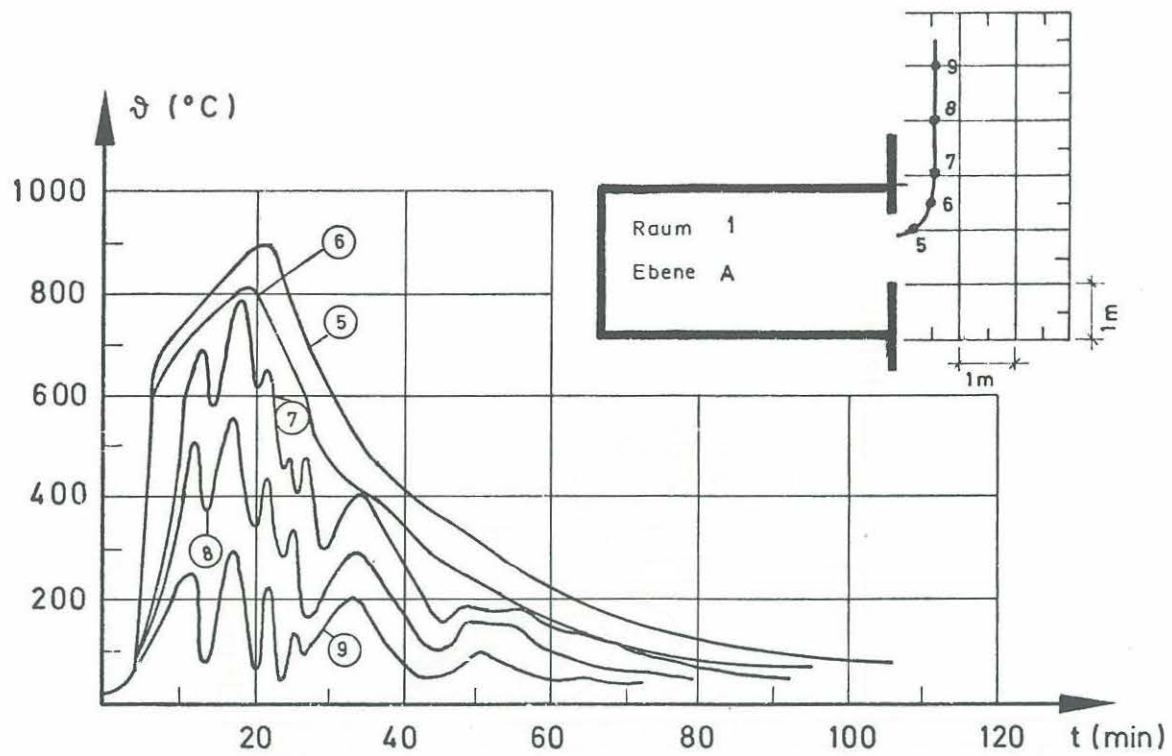


Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade

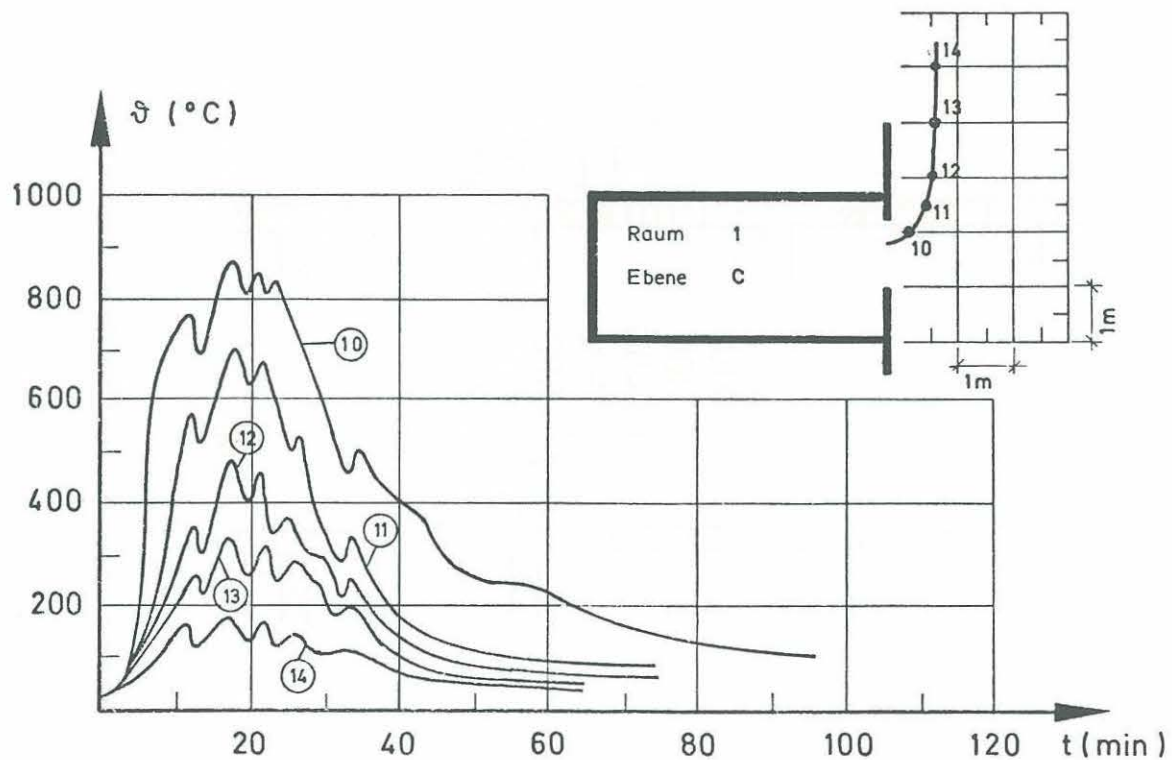
Anlage zum Versuch
Nr. 5
Kap. 6.2



Kurzzeitig aufgetretene Extremwerte des Temperaturfeldes vor der Fassade

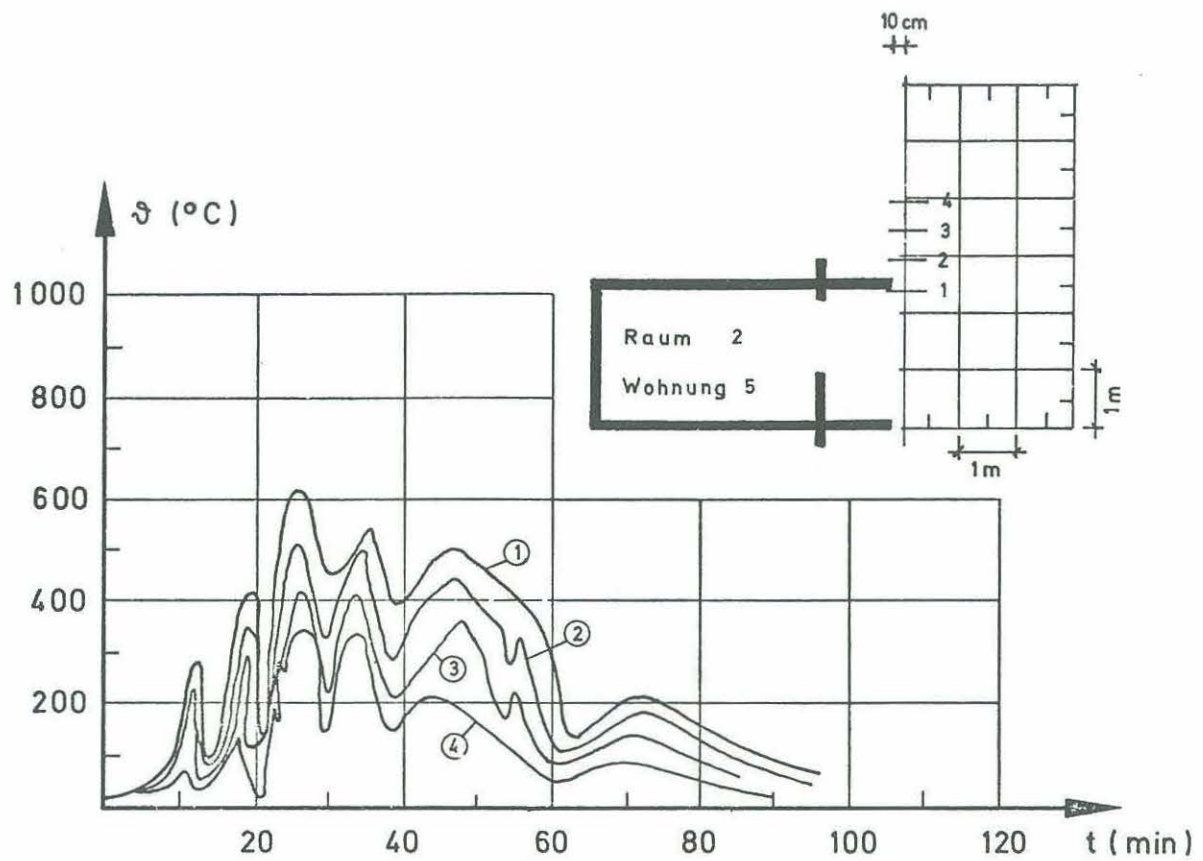


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene A)

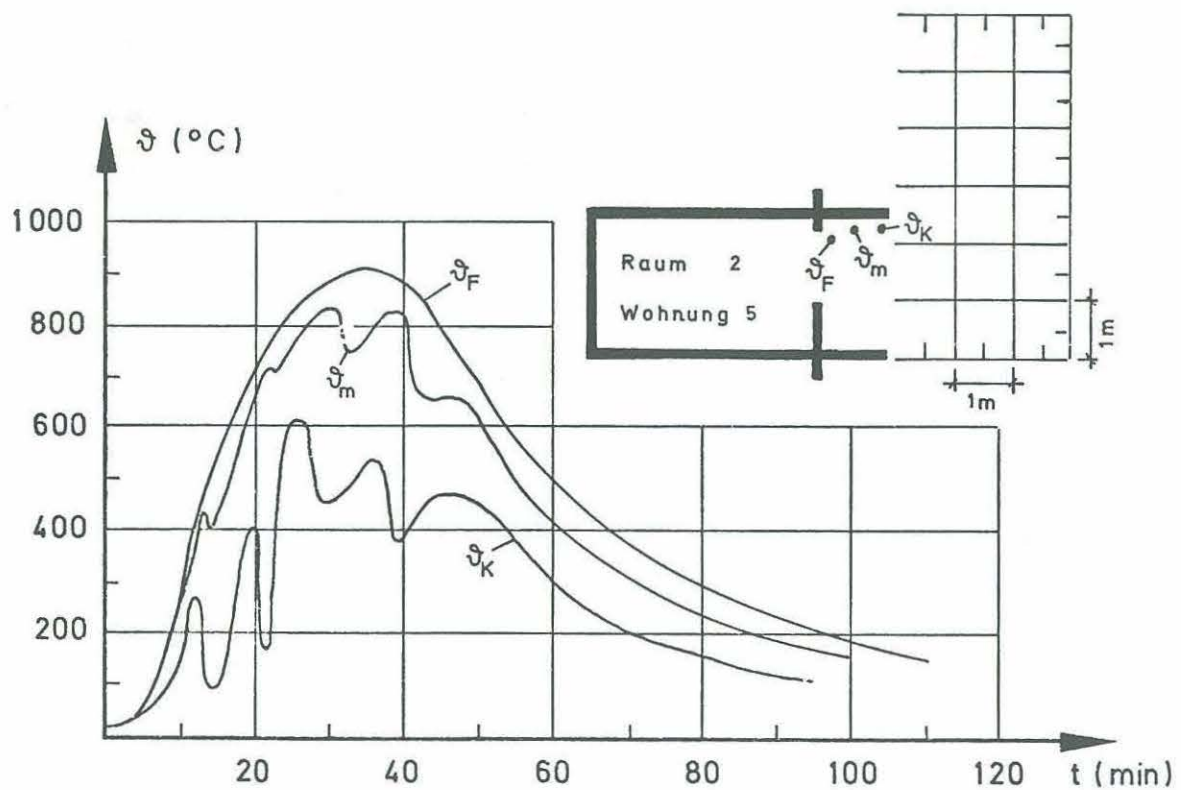


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene C)

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.2 Nr. 4

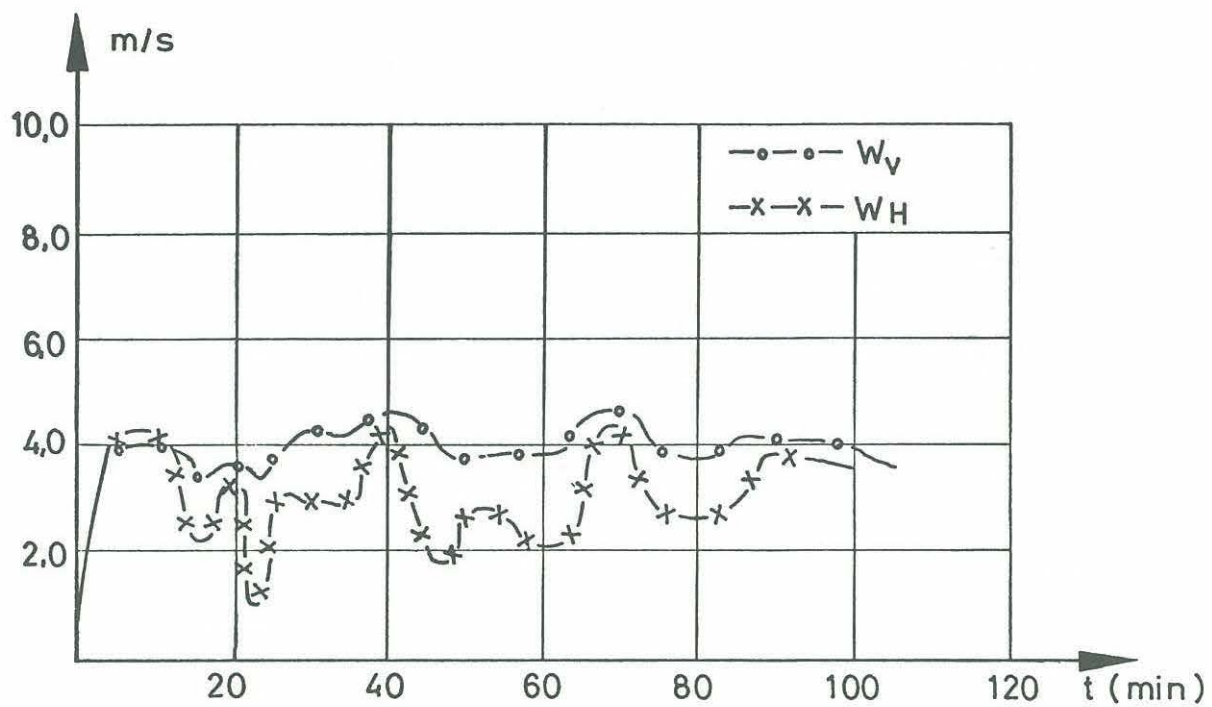


Temperaturen im Heißgasstrom 10 cm neben der Stahlbetonstütze



Temperaturen unter der Balkonplatte (Meßlinie in der Fenstermittelebene)

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.2 Nr. 5

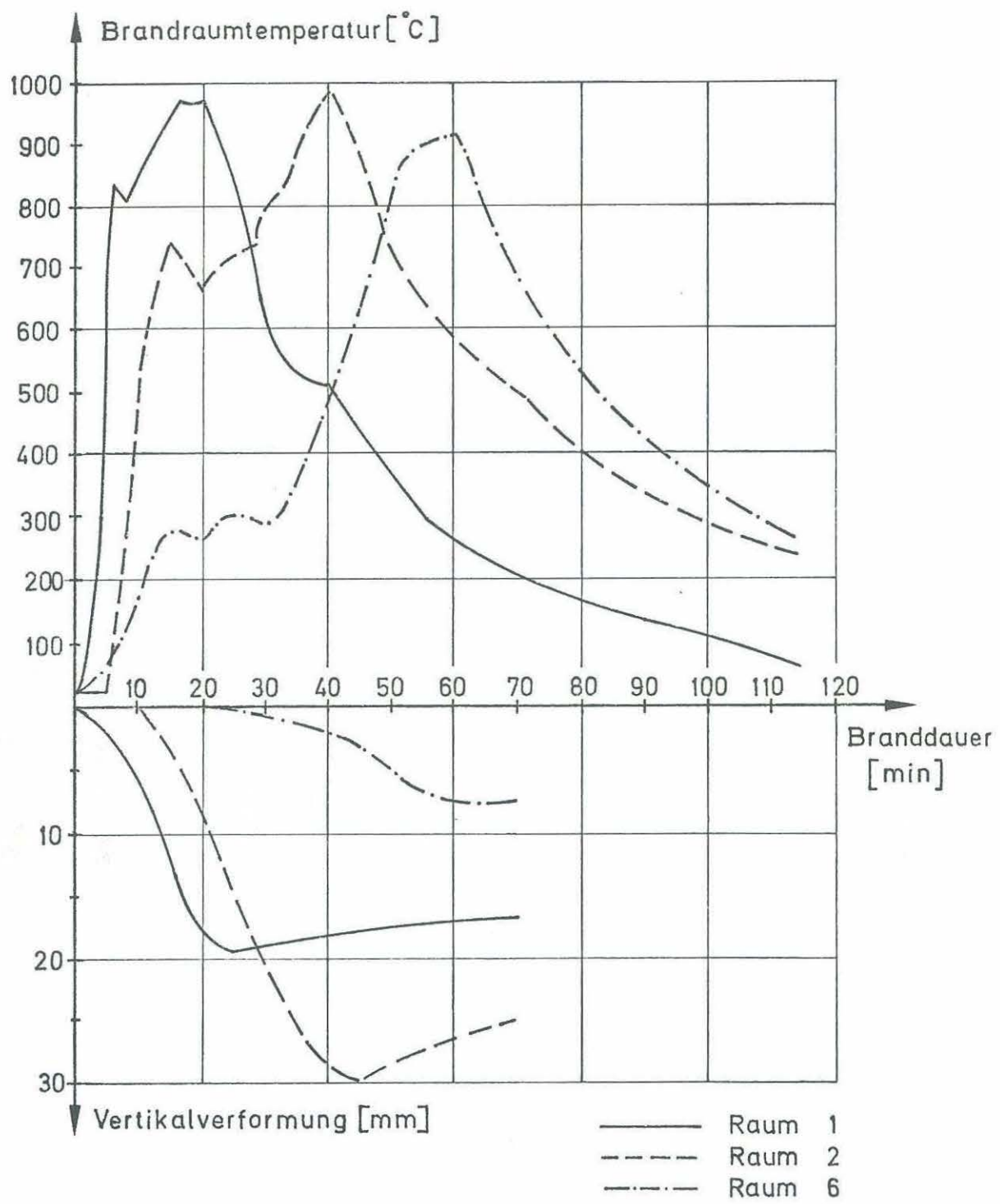


Verlauf der Heißgasgeschwindigkeit

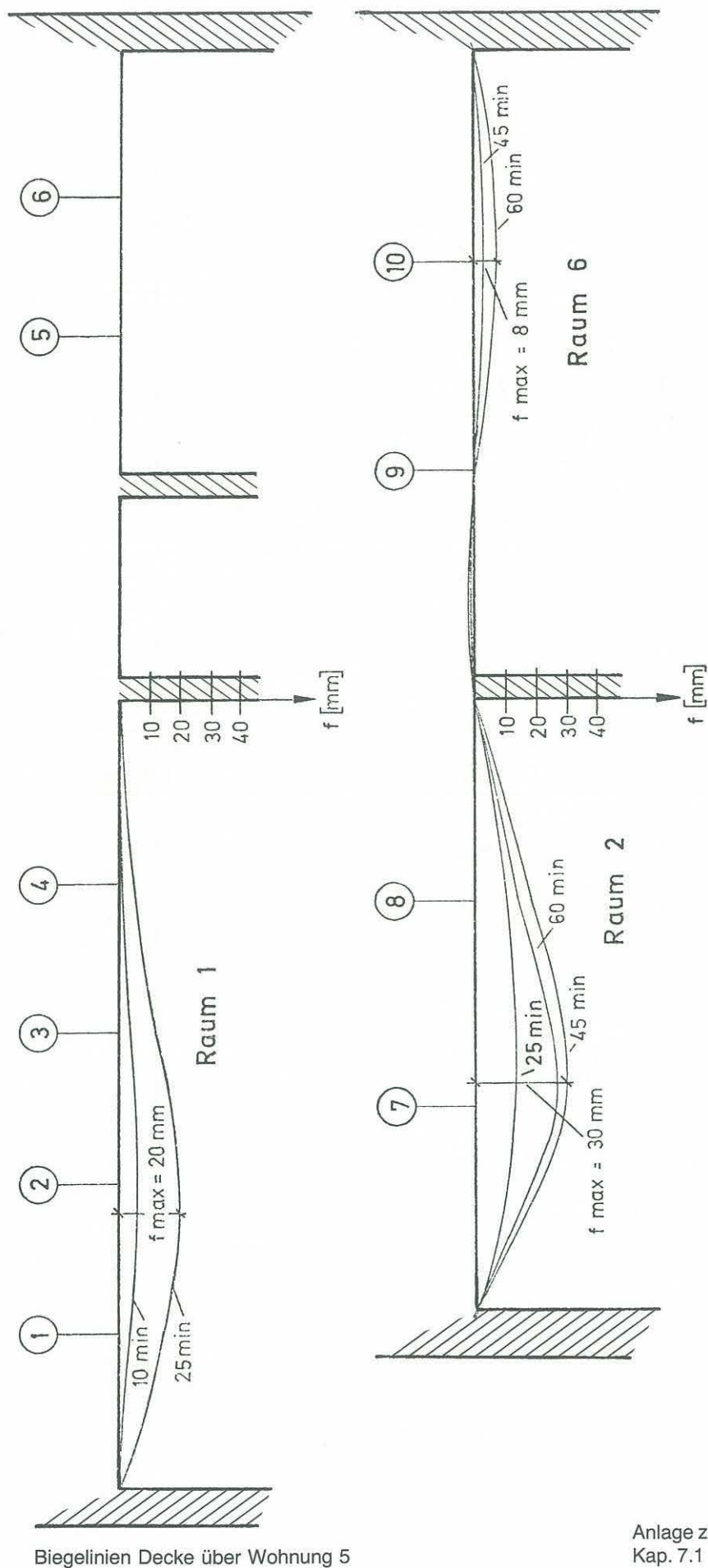
W_h = horizontale Geschwindigkeit 20 cm unter OK Brandraumfenster

W_v = vertikale Geschwindigkeit 1,5 m über OK Brandraumfenster

Anlage zum Versuch 5
Kap. 6.2 Nr. 6



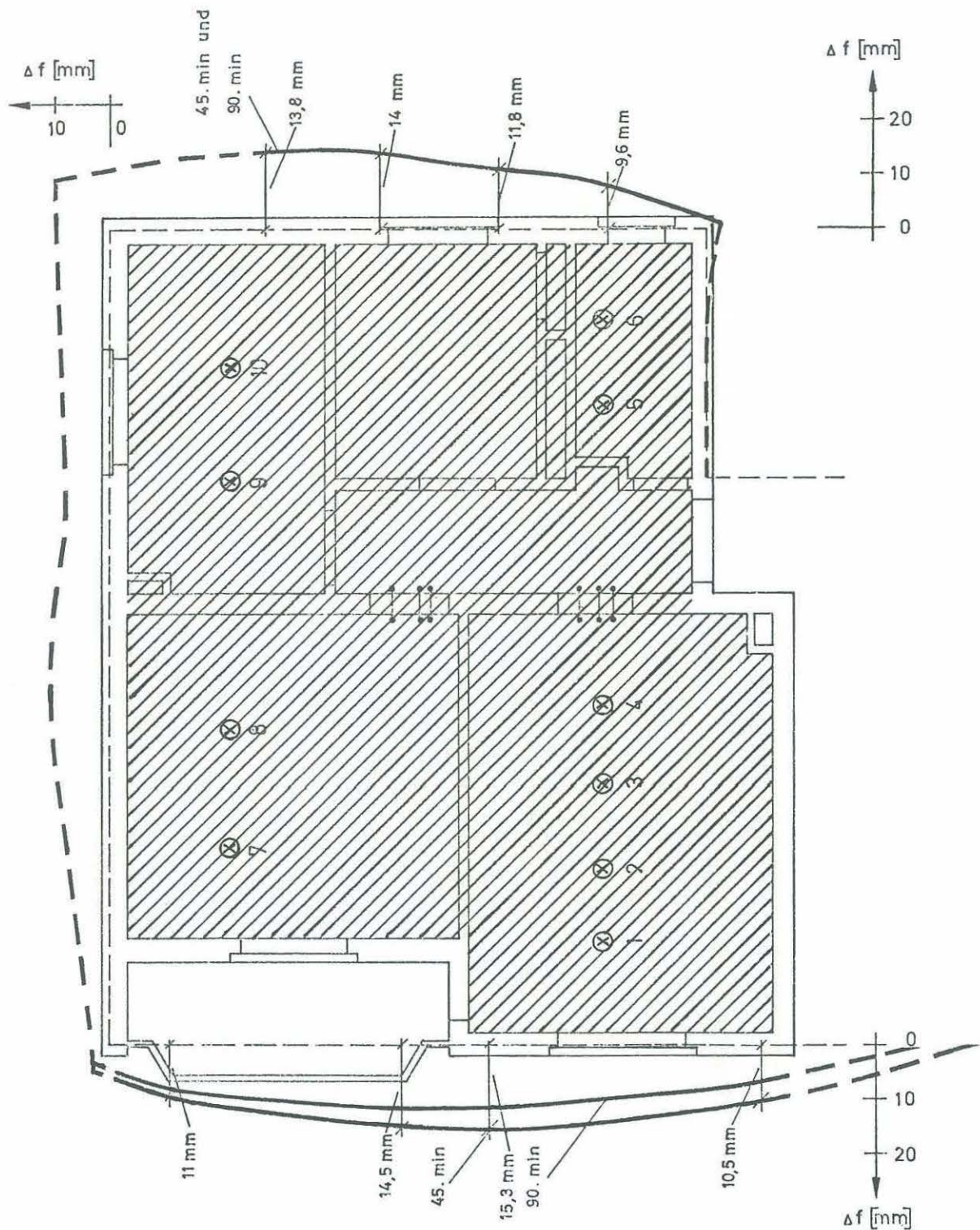
Brandraumtemperaturen Wohnung 5 – Maximalverformungen Decke über Wohnung 5



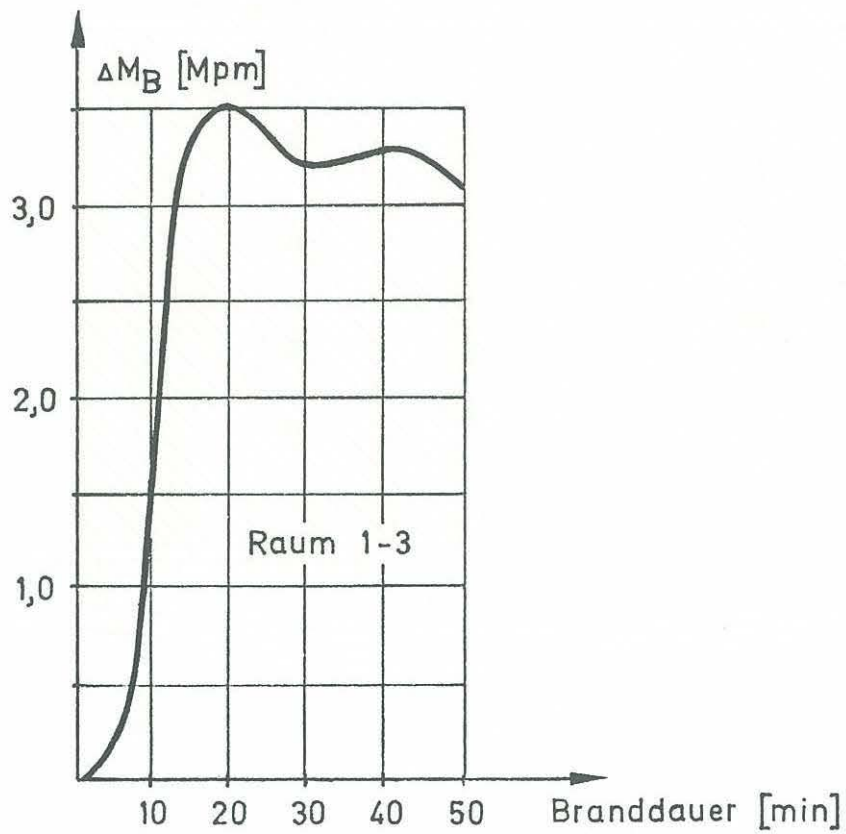
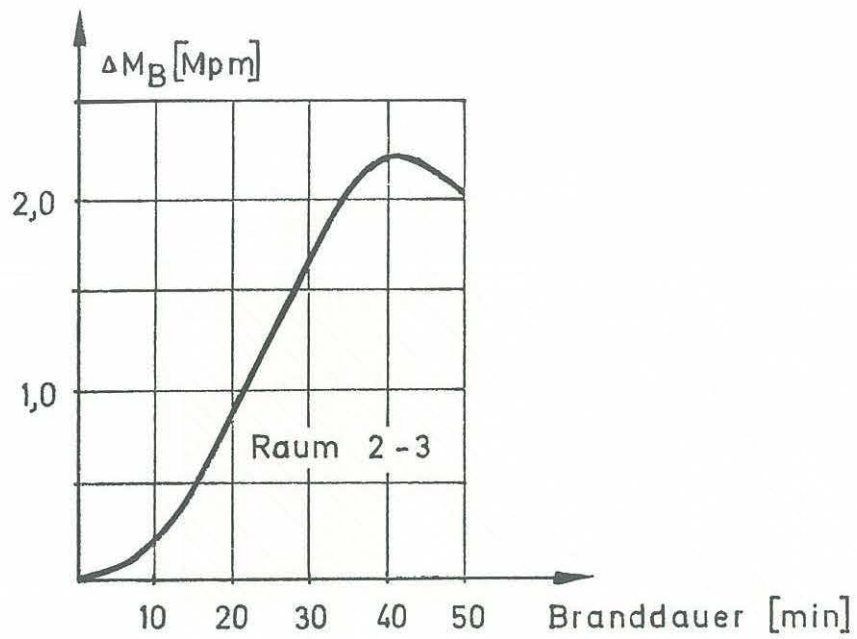
Biegelinien Decke über Wohnung 5

Anlage zum Versuch
Kap. 7.1

Nr. 2

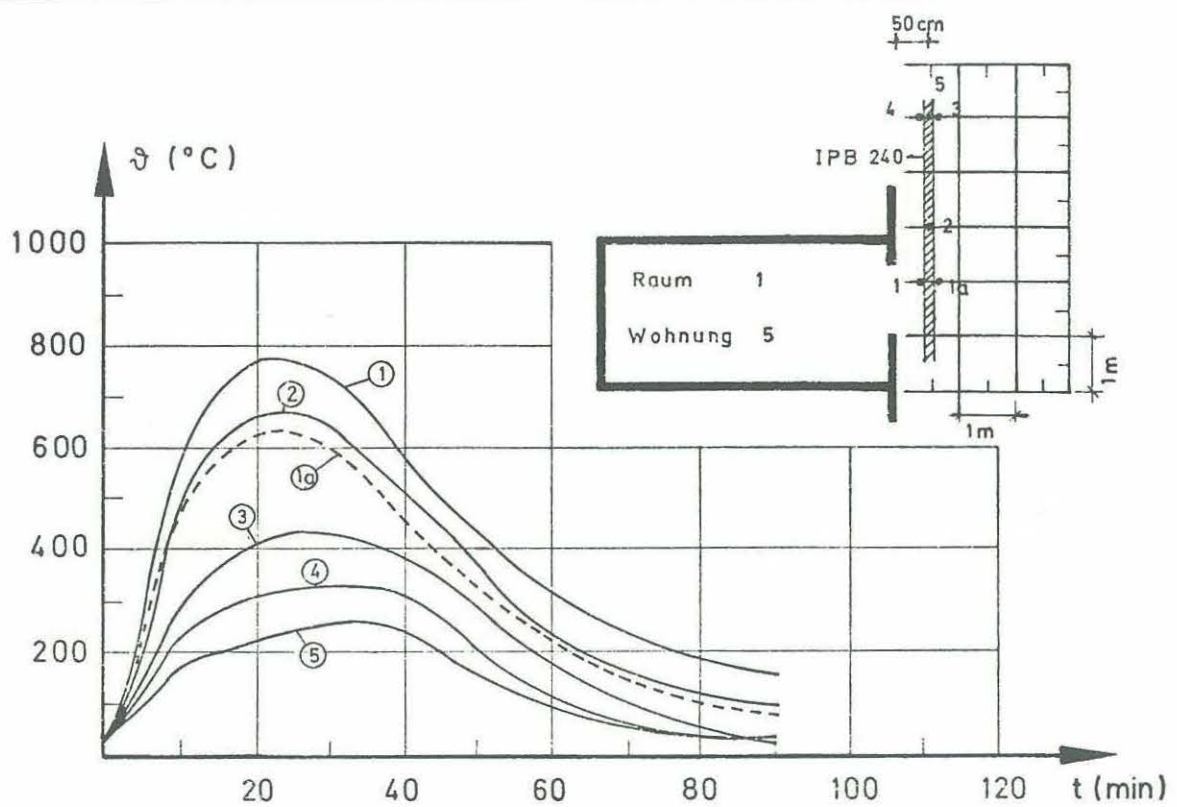


Anlage zum Versuch 5
Kap. 7.1 Nr. 3

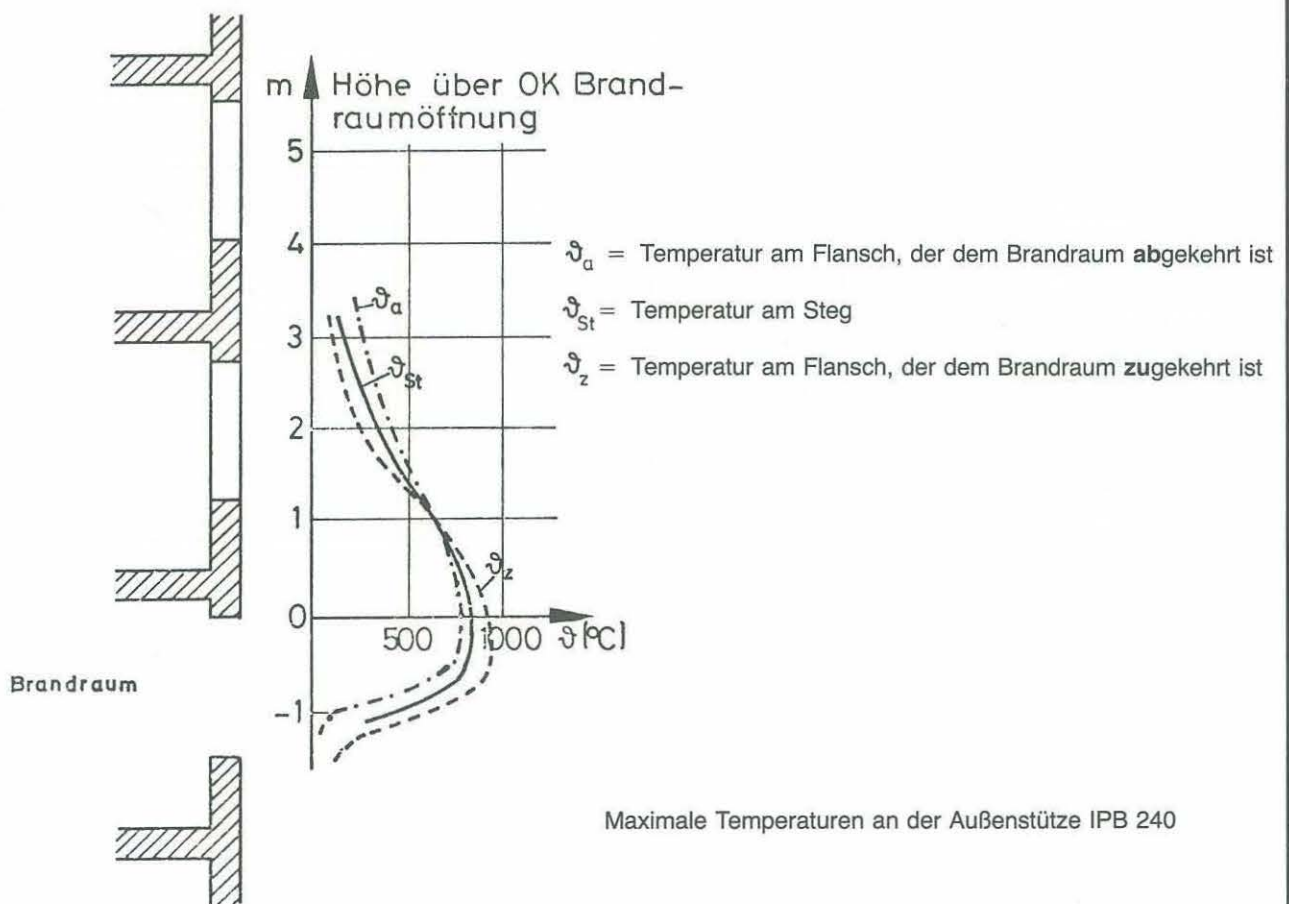


Änderung der Stützmomente Decke über Wohnung 5 zwischen Raum 1 und 3 bzw. 2 und 3

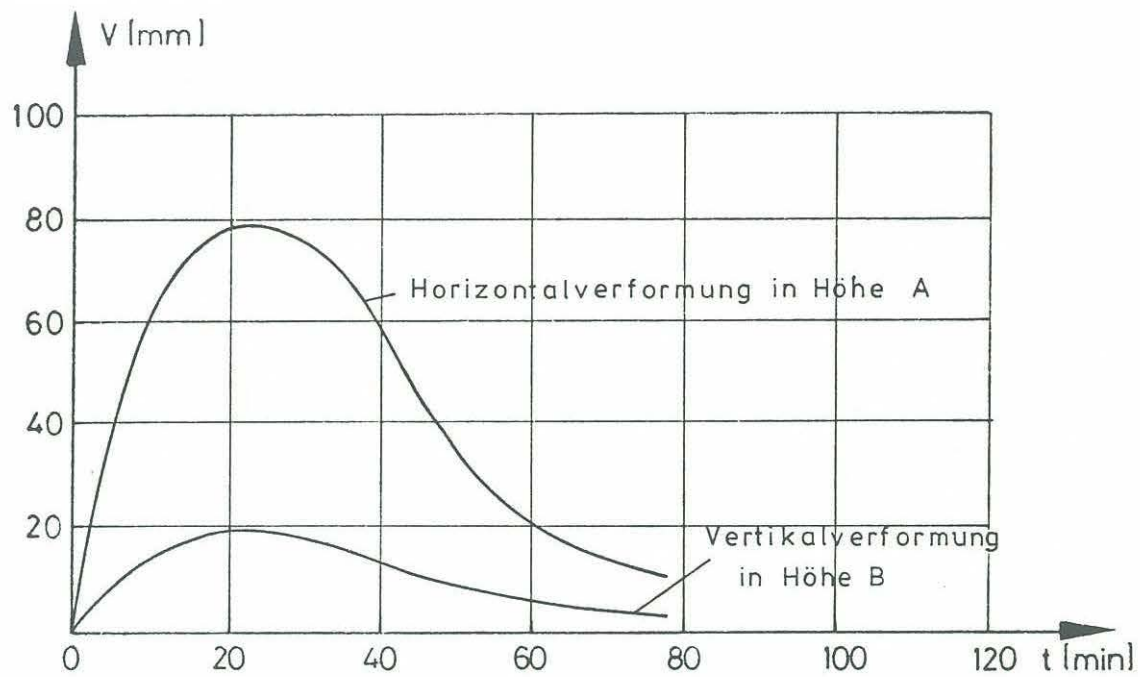
Anlage zum Versuch 5
Kap. 7.1 Nr. 4



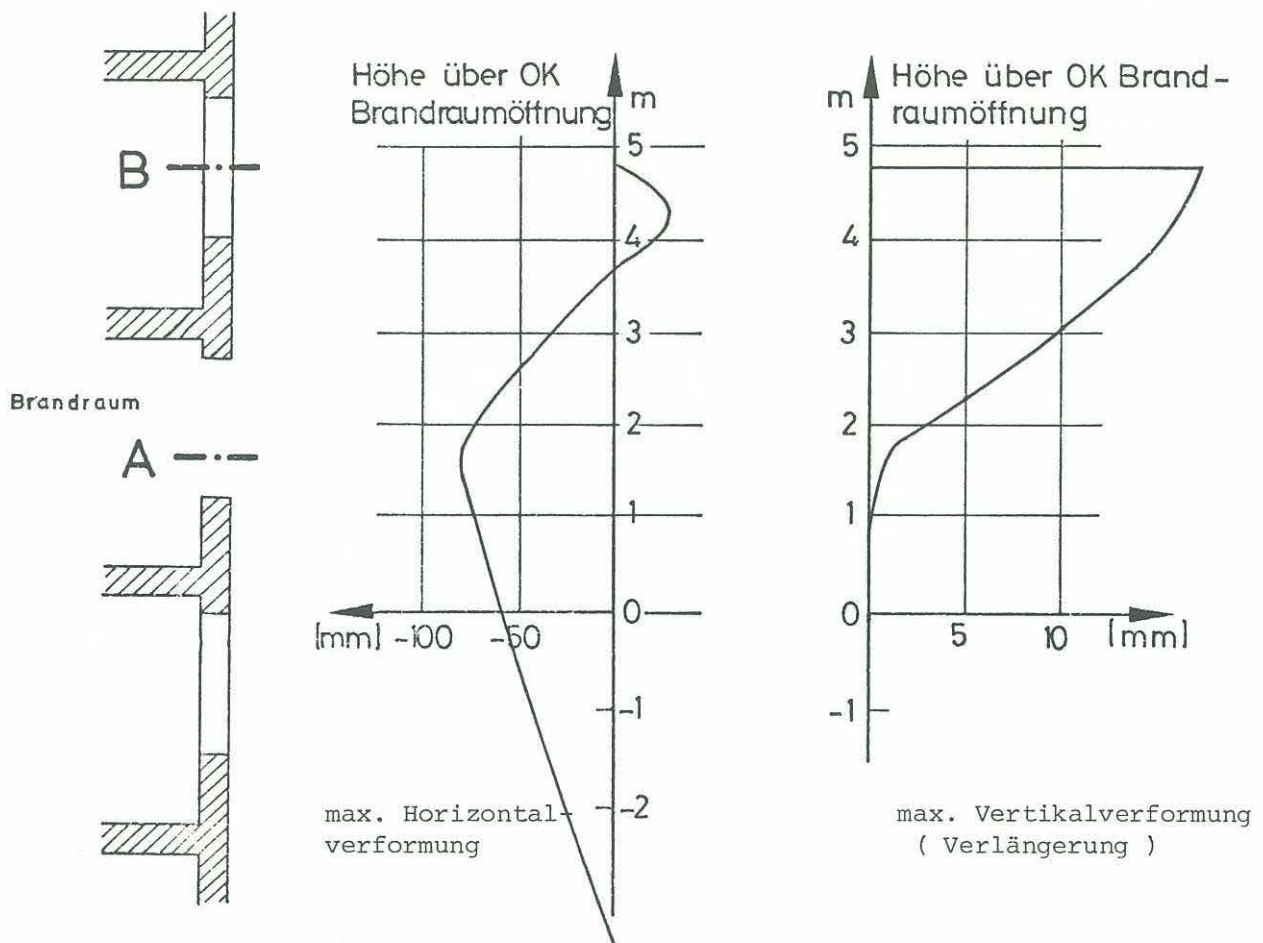
Temperaturen an der Stahlstütze IPB 240



Maximale Temperaturen an der Außenstütze IPB 240

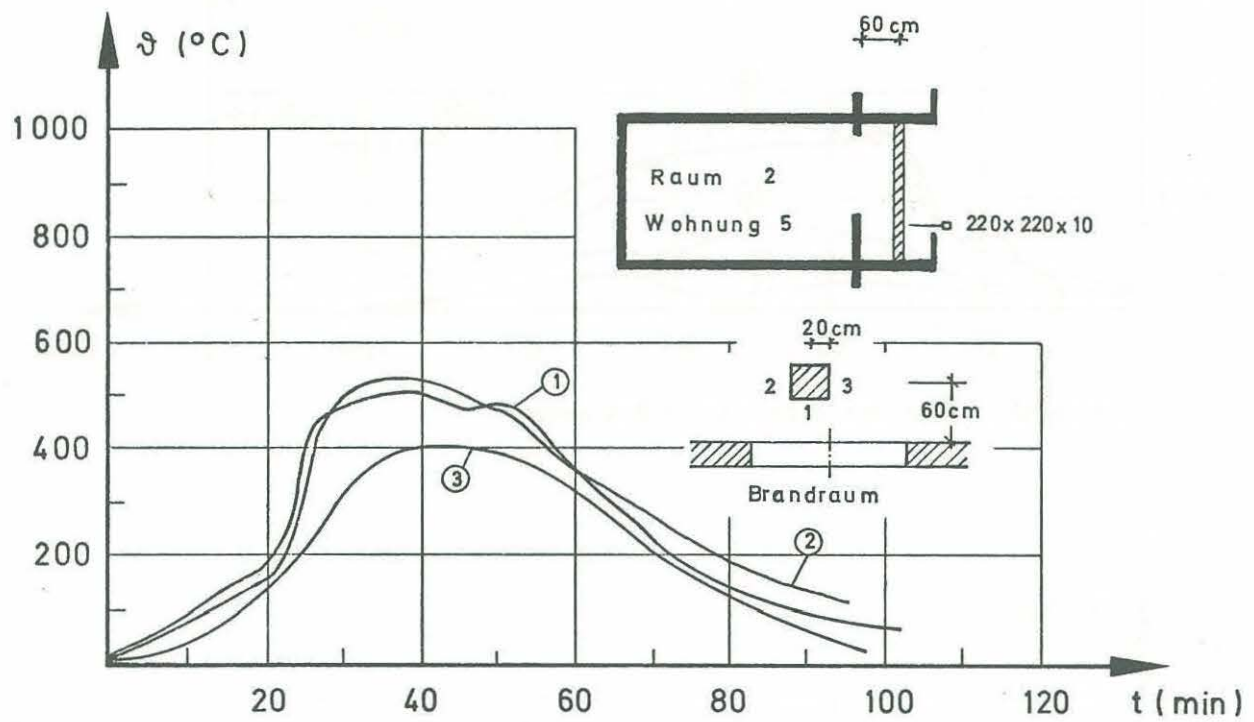


Zeit – Verformungslinien in Höhe der Punkte A und B

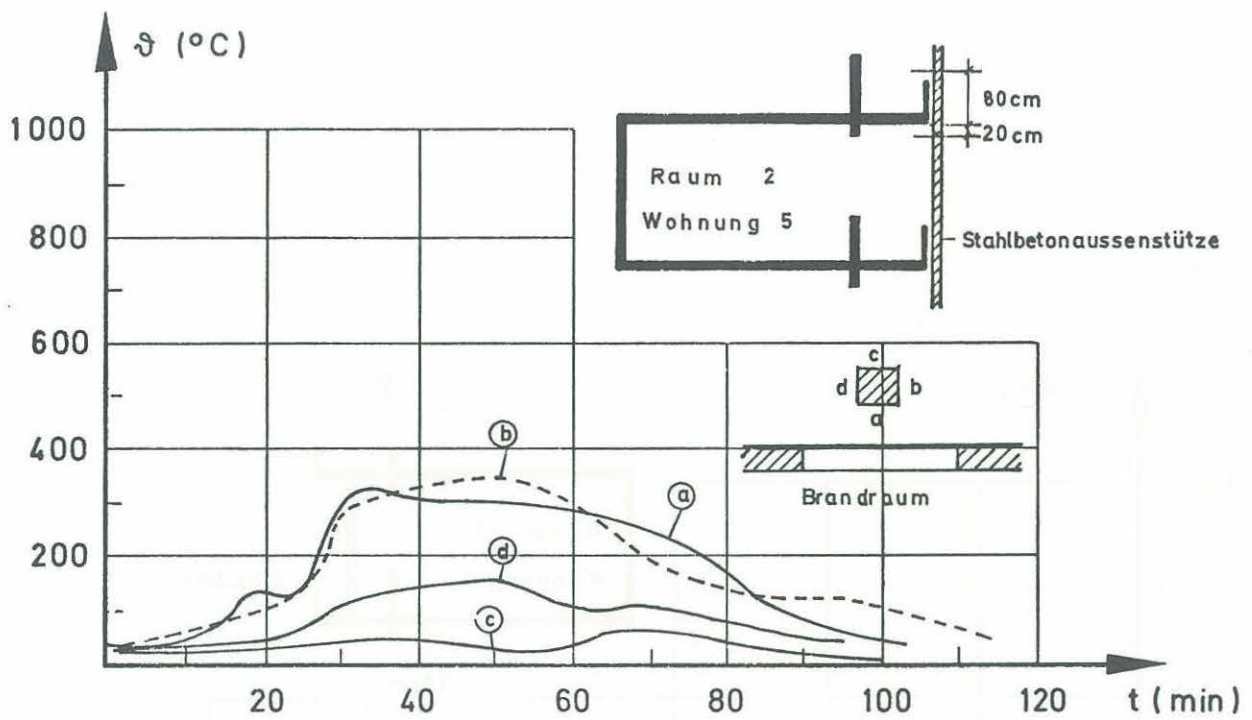


Maximale Verformungen der Außenstütze IPB 240

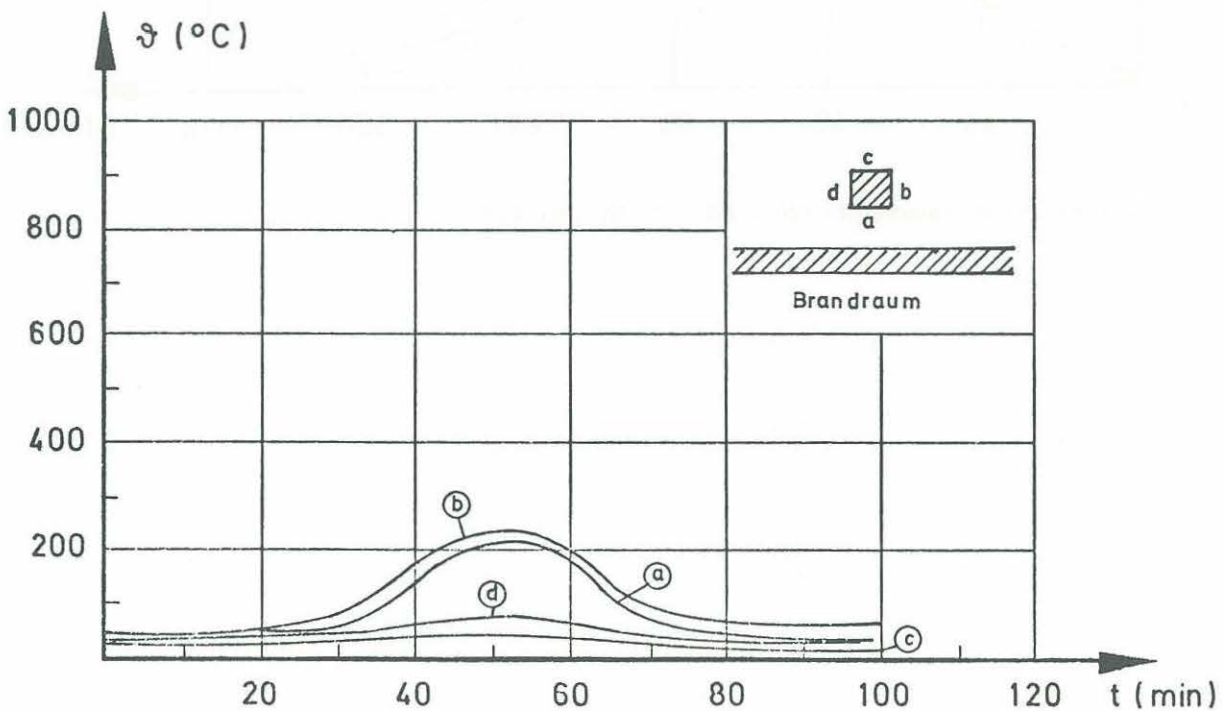
Anlage zum Versuch 5
Kap. 8.4 Nr. 2



Temperaturen am Quadratrohr 220 × 220 × 10 (20 cm unterhalb des Stützkopfes)



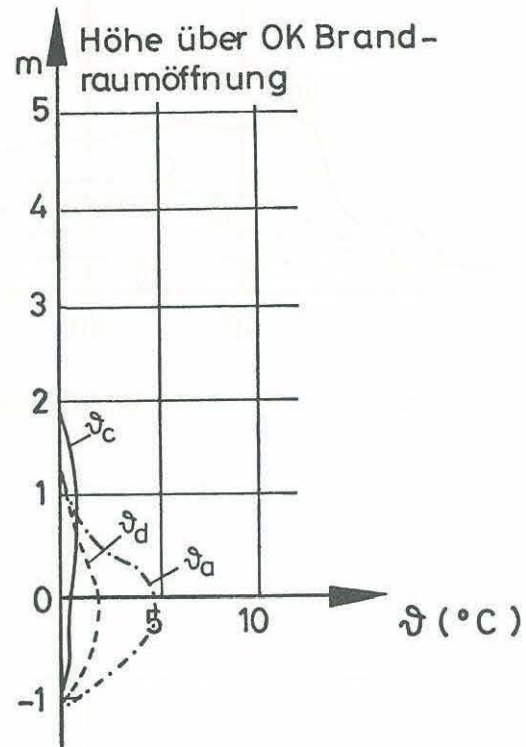
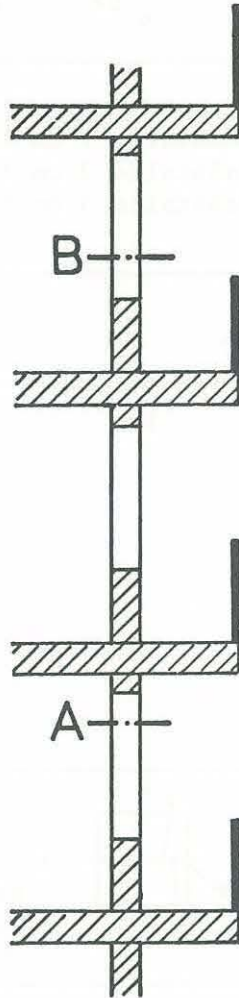
Höhe des Meßquerschnittes: 20 cm unter UK Balkonplatte



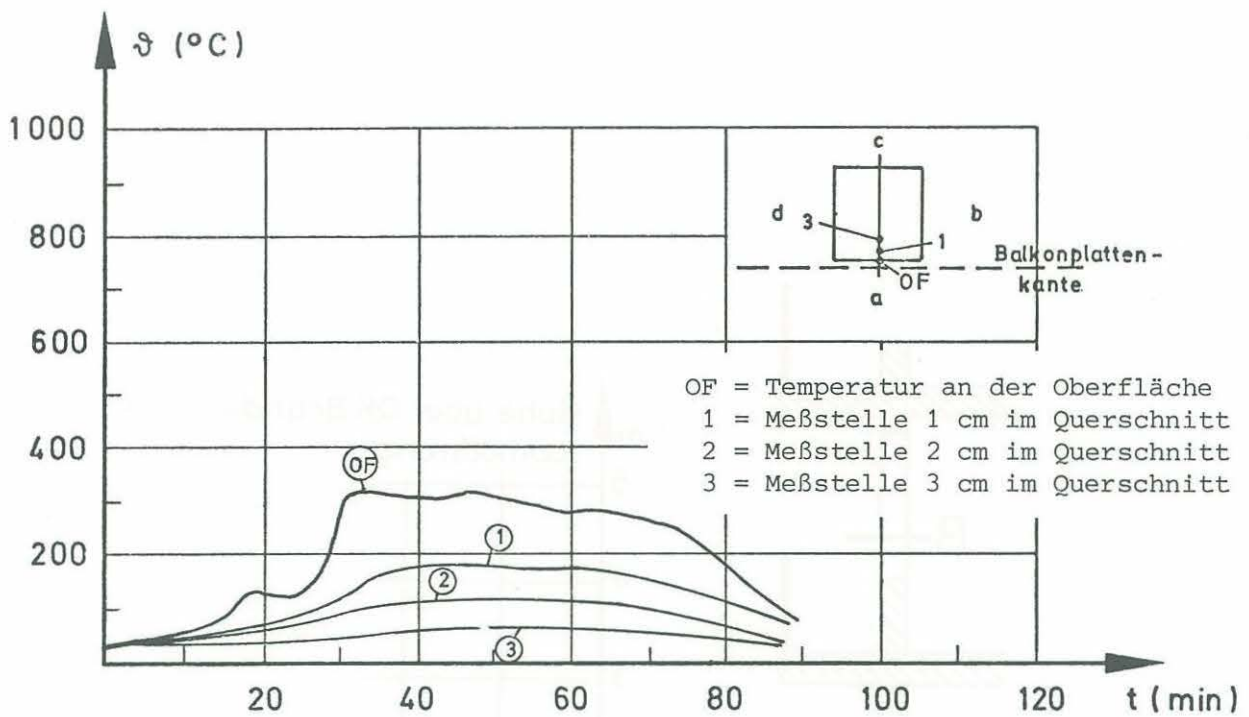
Höhe des Meßquerschnittes: 80 cm über UK Balkonplatte

Temperaturen an der Oberfläche der Stahlbetonaussenstütze

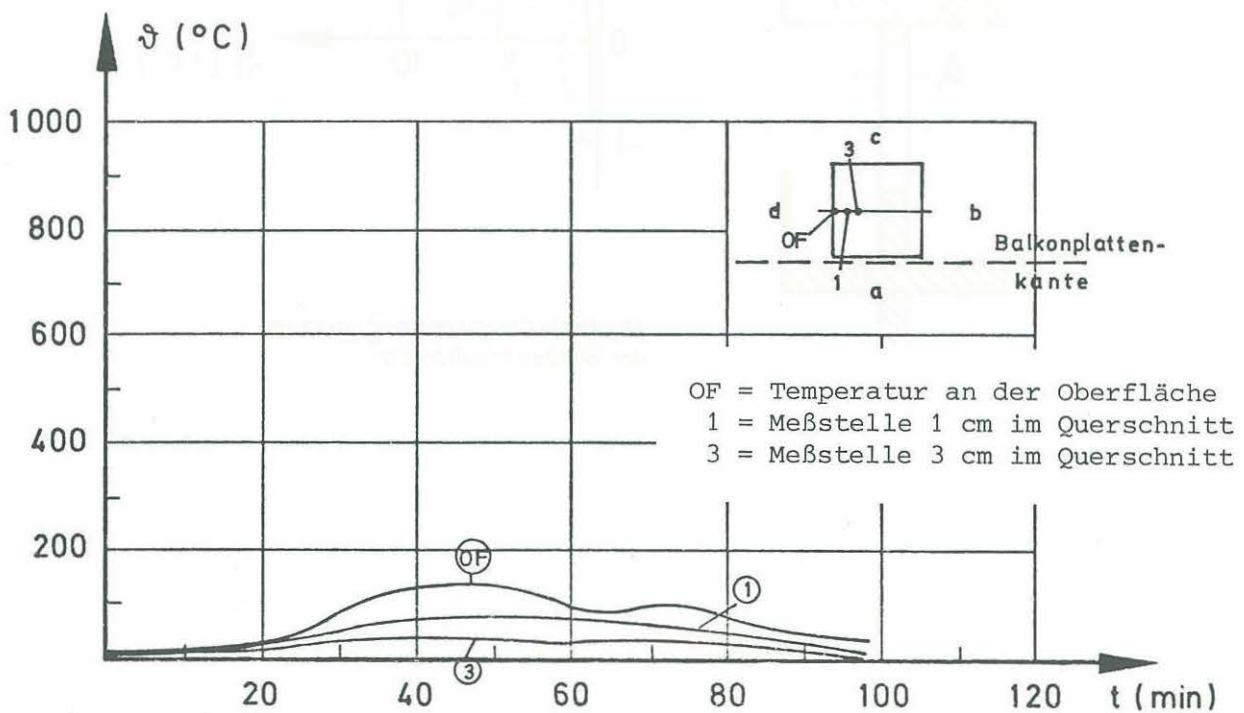
Anlage zum Versuch 5
Kap. 8.4 Nr. 4



Maximale Oberflächentemperaturen der Stahlbetonaußenstütze



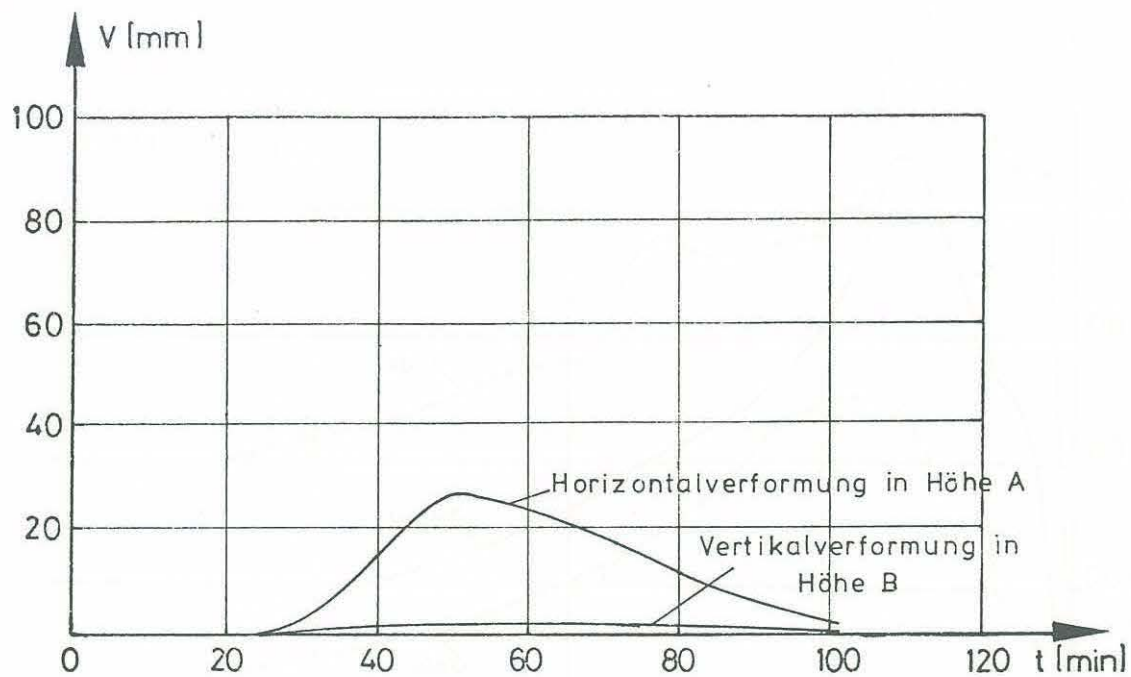
Höhe des Querschnittes: 20 cm unter UK Balkonplatte, Seite a



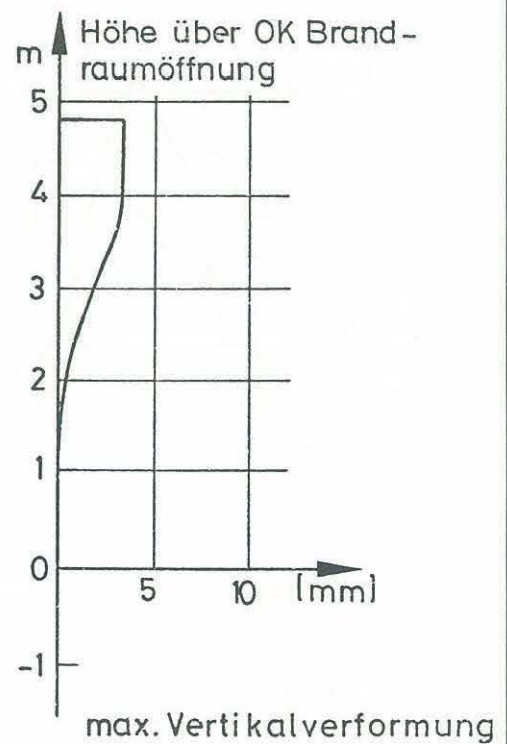
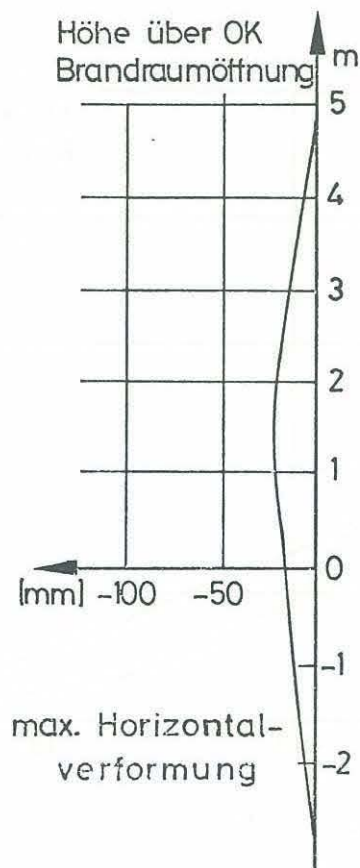
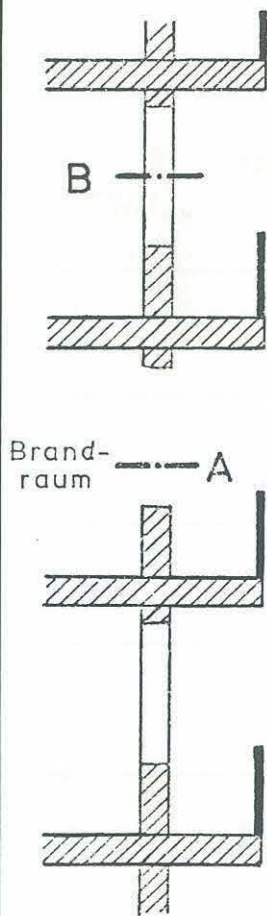
Höhe des Querschnittes: 20 cm unter UK Balkonplatte, Seite d

Temperaturen in verschiedenen Querschnitten der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch 5
 Kap. 8.4 Nr. 6

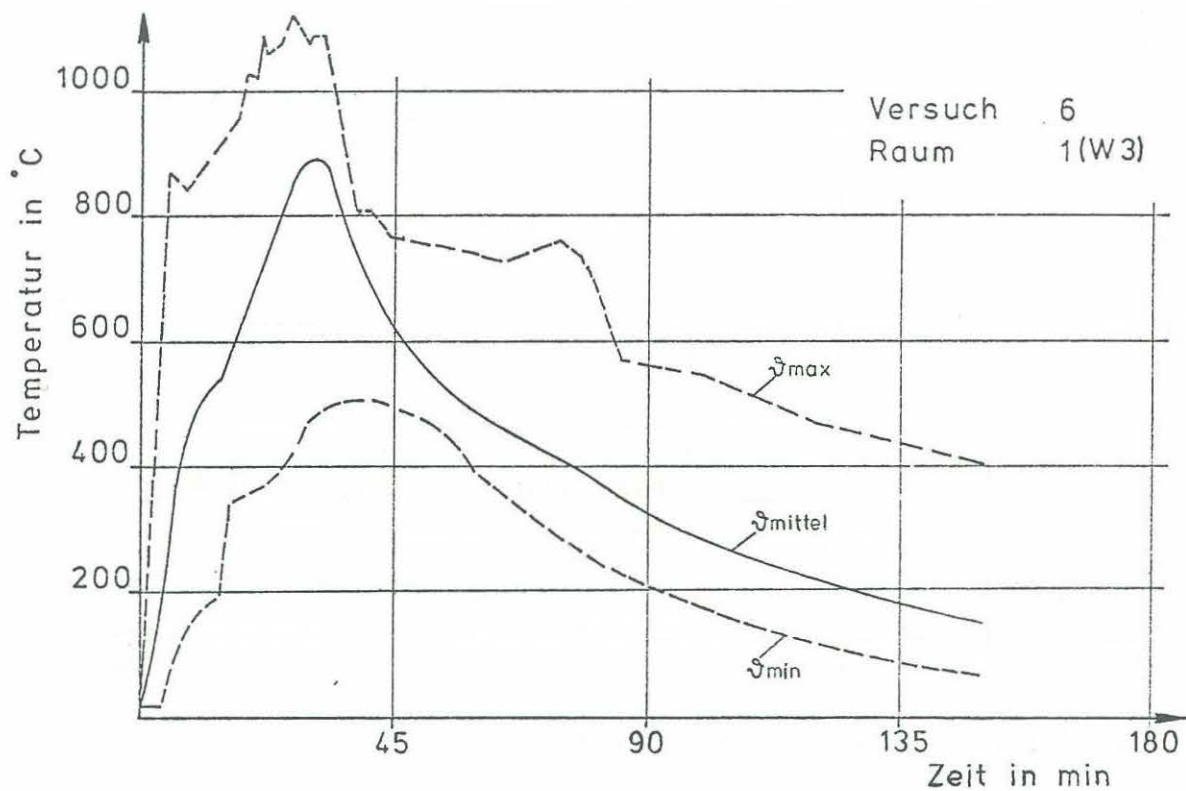


Zeit – Verformungslinien in Höhe der Punkte A und B

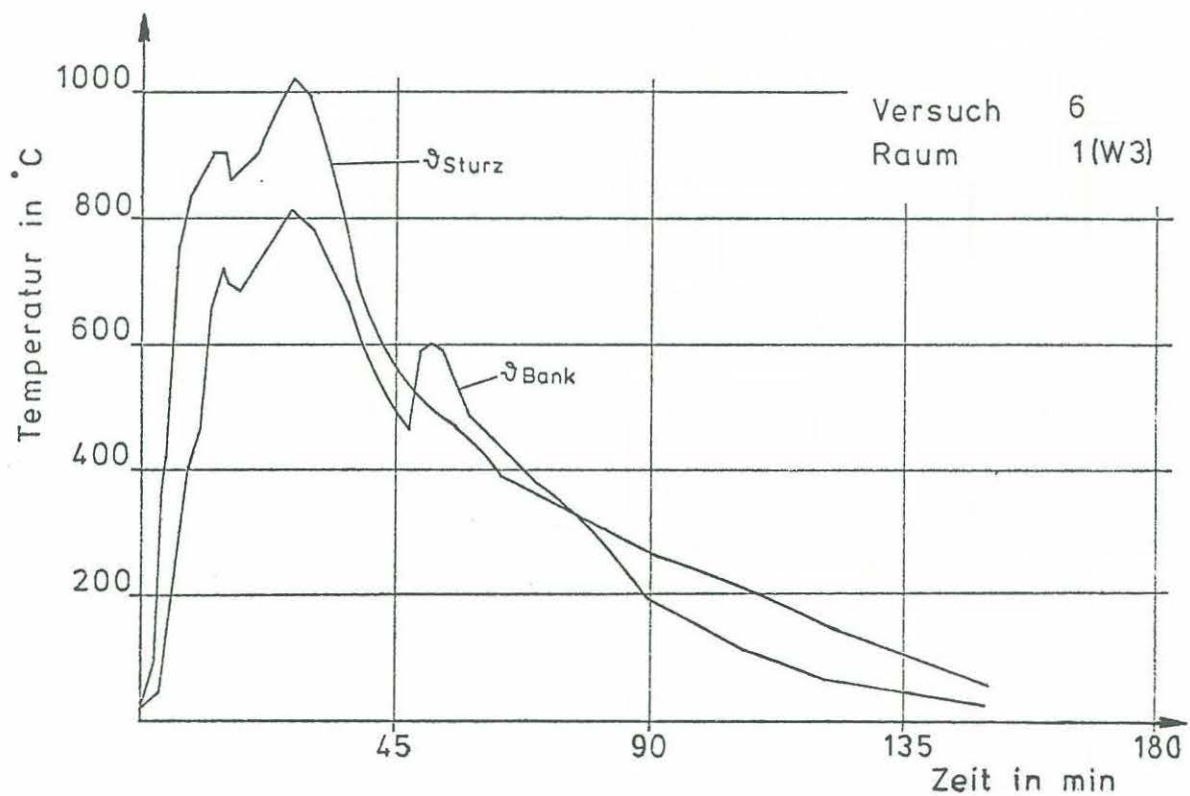


Maximale Verformungen der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch 5
Kap. 8.4 Nr. 7

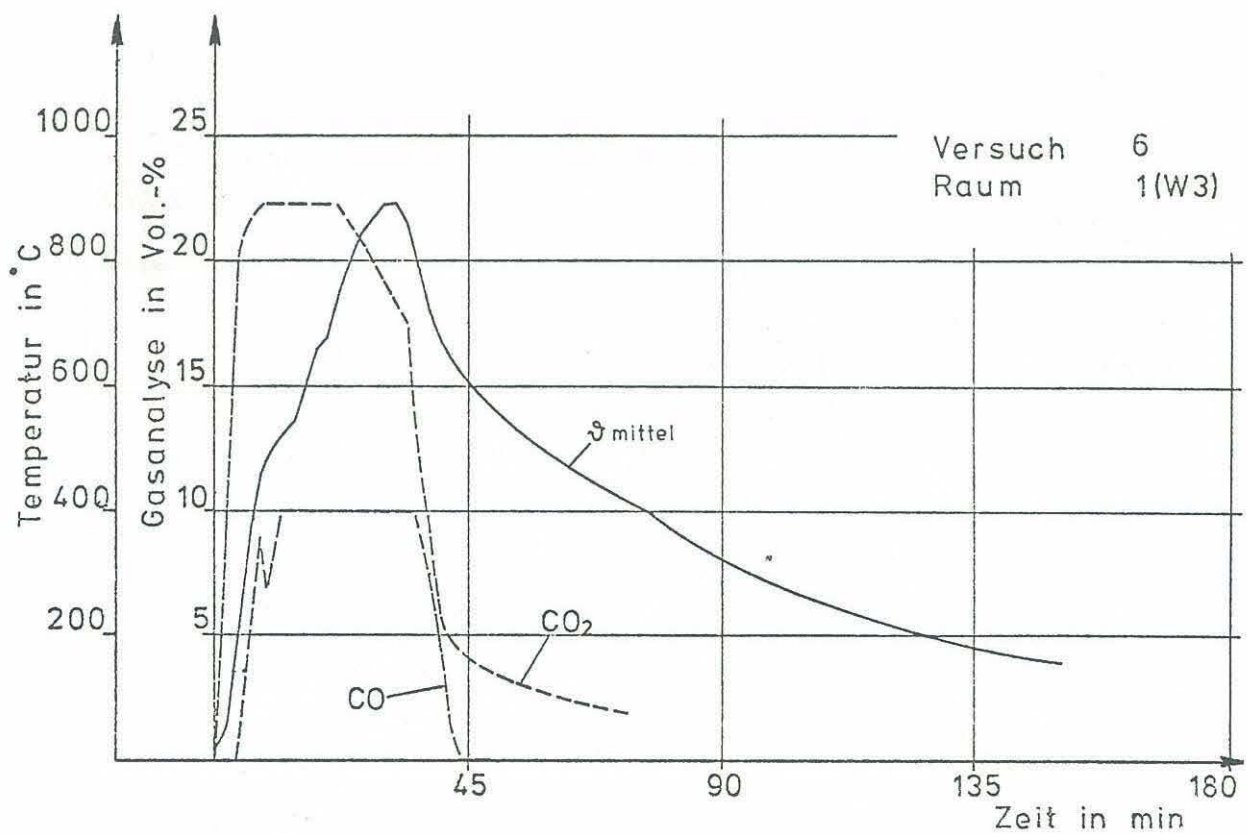
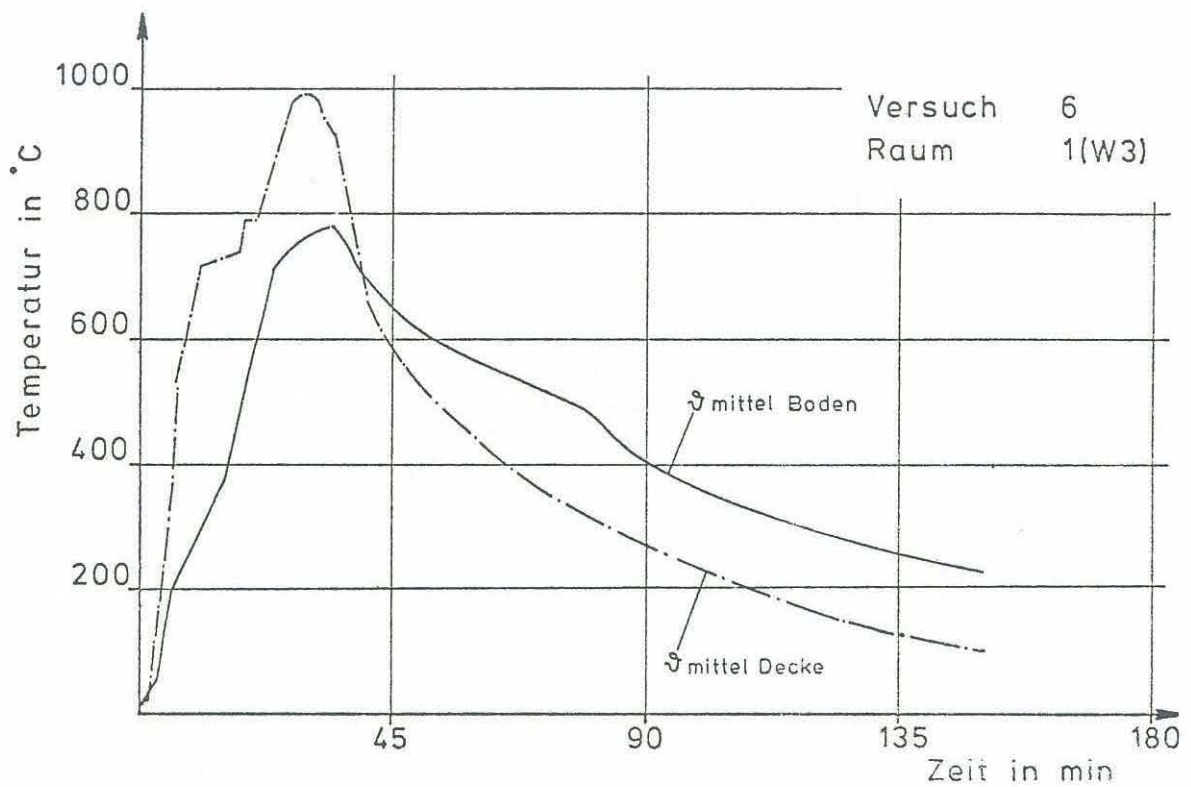


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

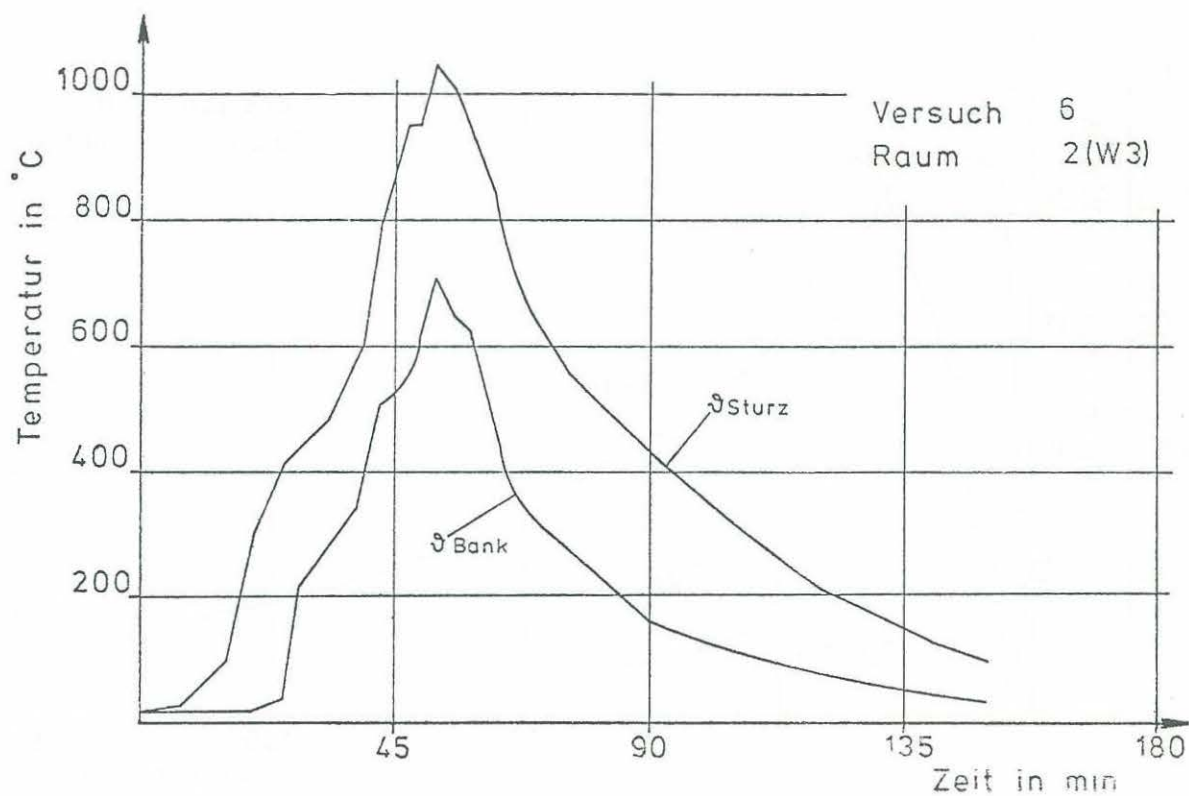
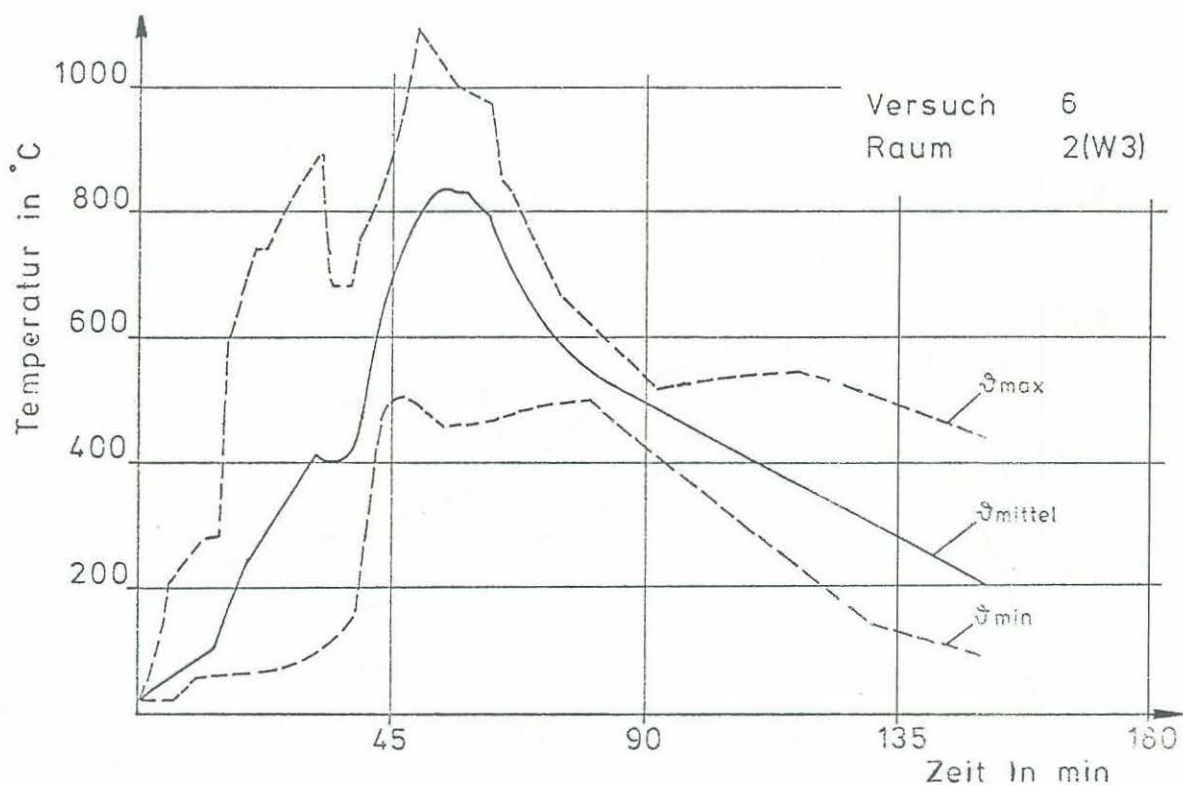


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

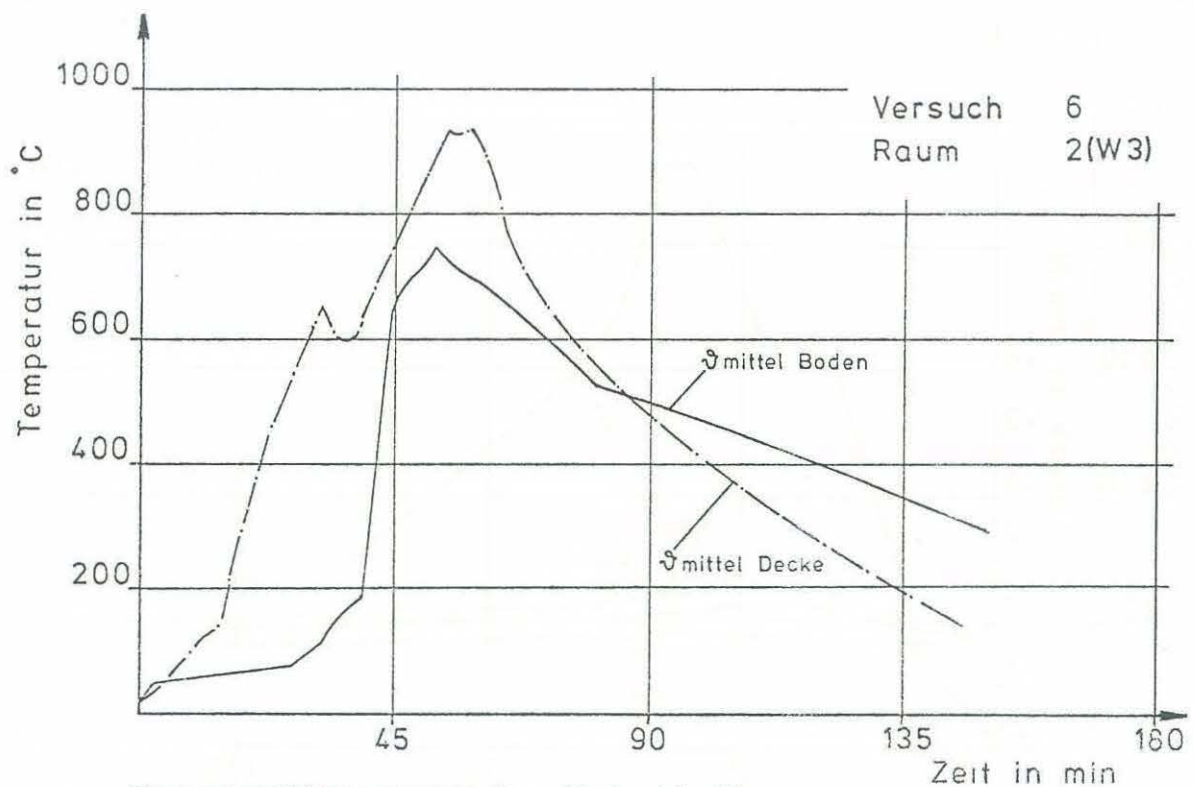
Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2



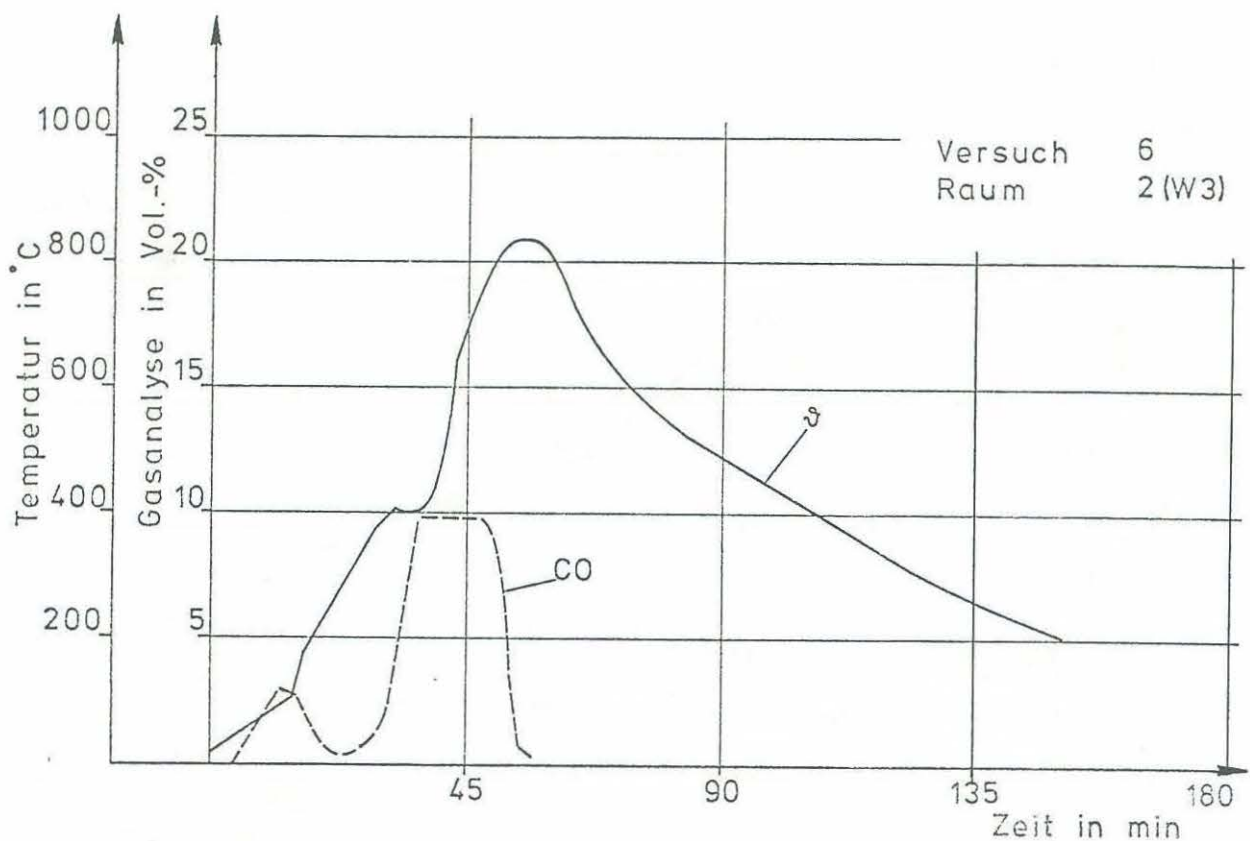
Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4



Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 5
Kap. 6.1 Nr. 6

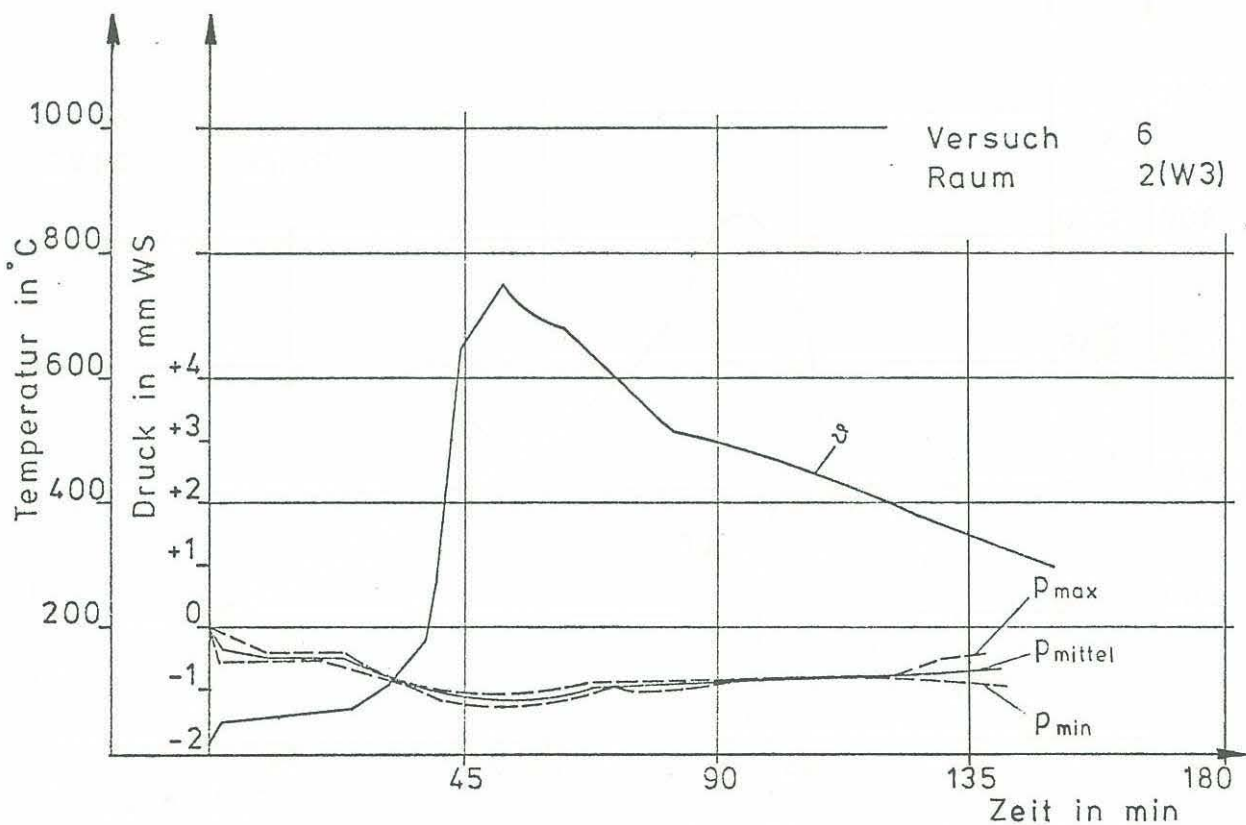
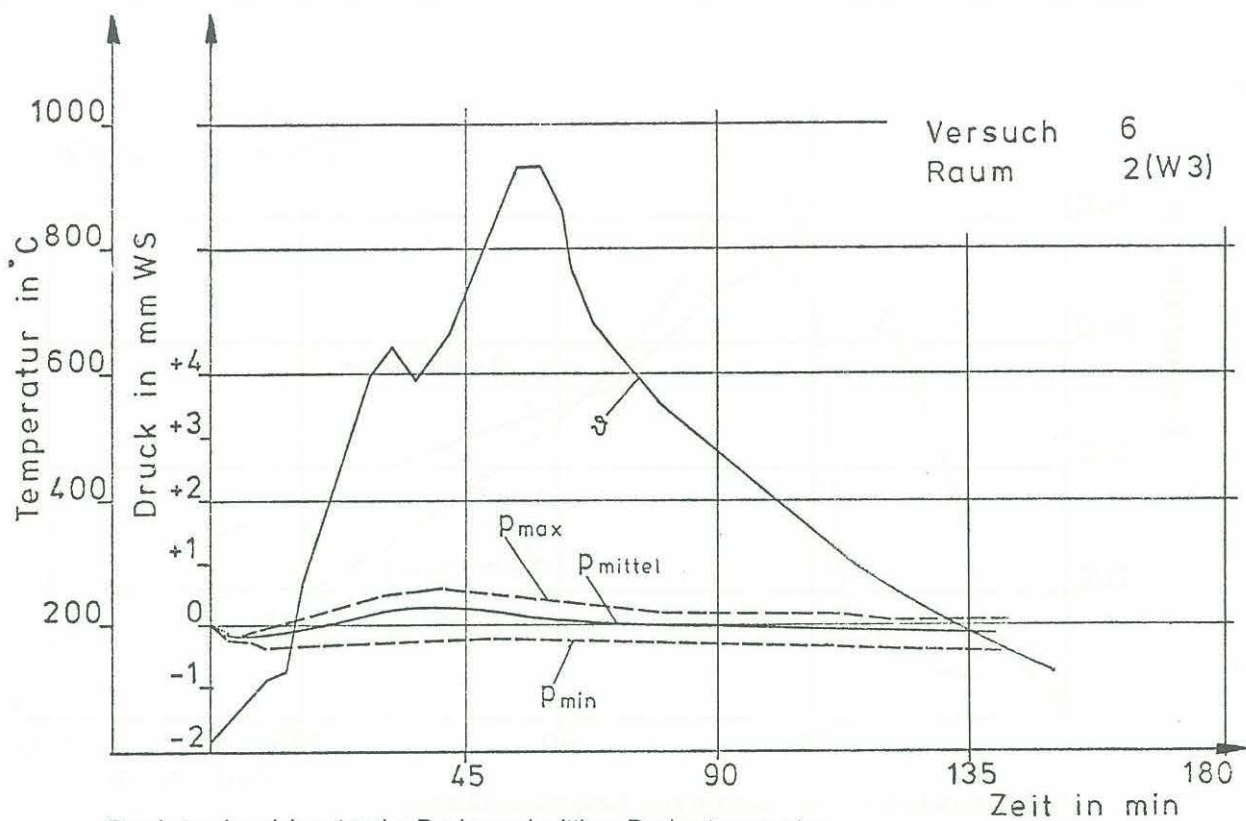


Temperaturschichtung gemessen in zwei horizontalen Ebenen

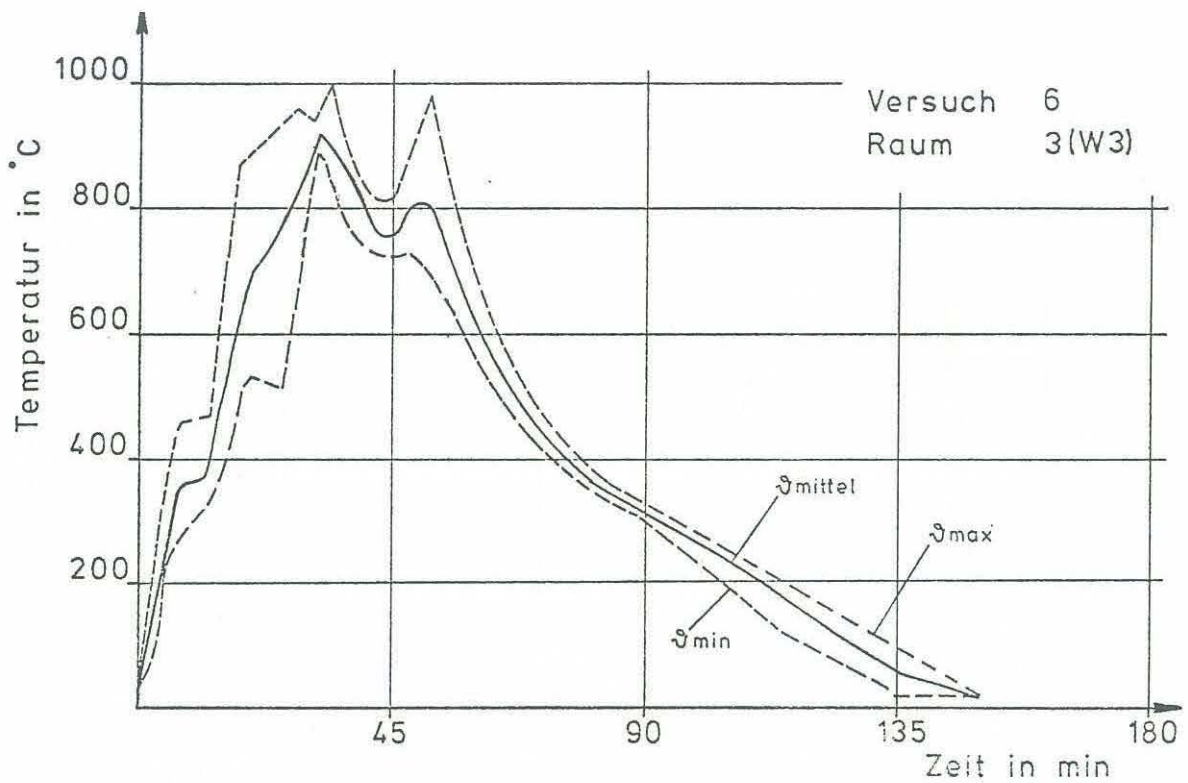


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

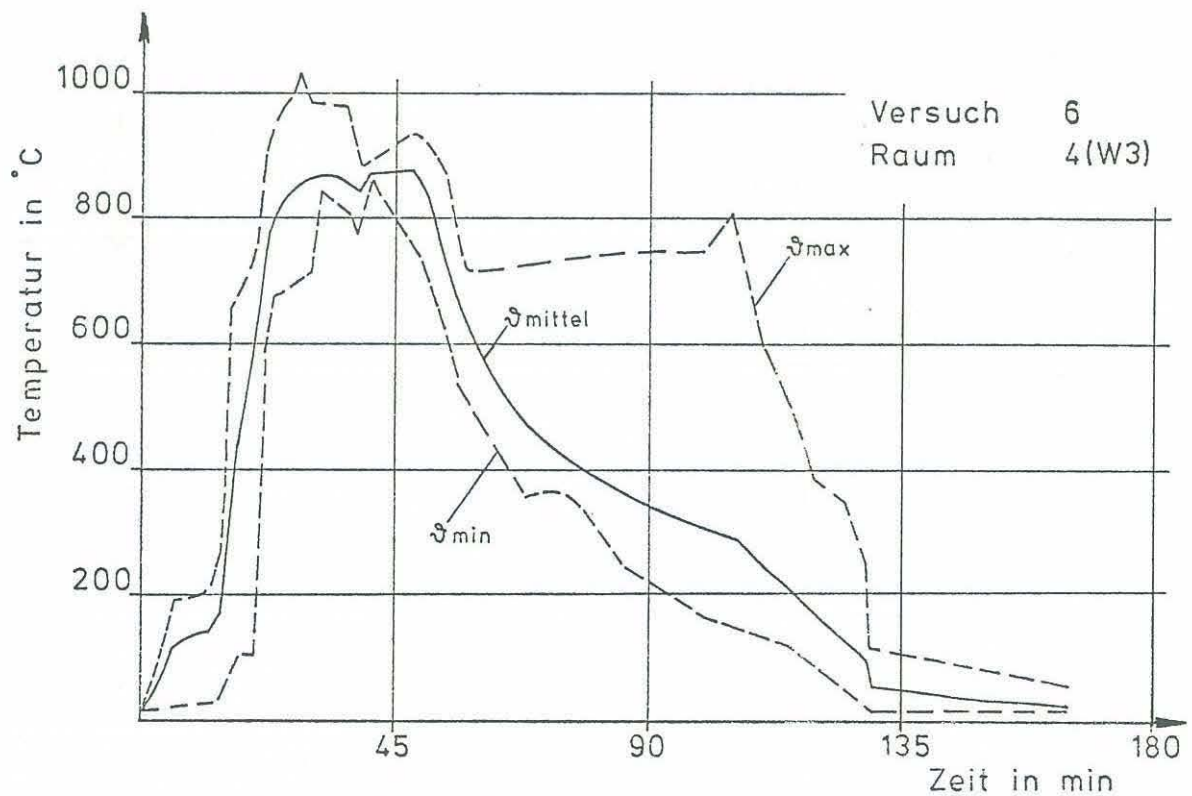
Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 7
Kap. 6.1 Nr. 8



Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 9
Kap. 6.1 Nr. 10

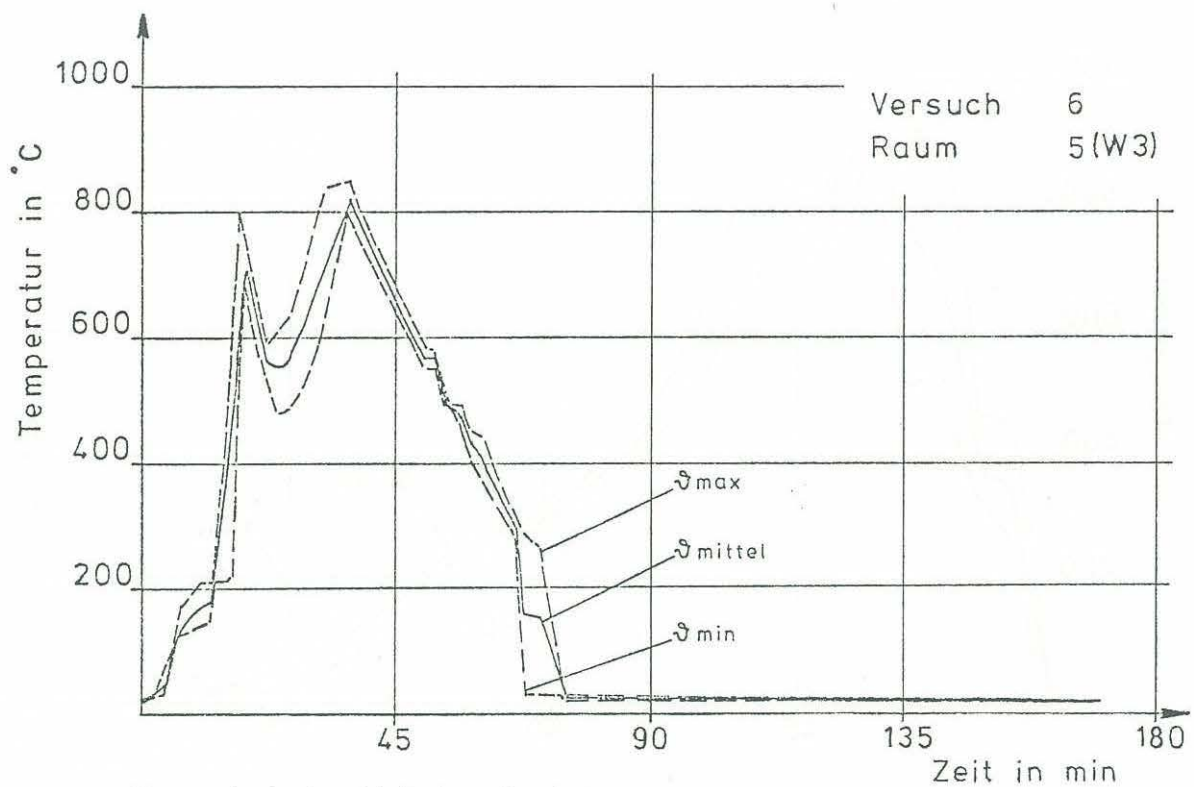


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

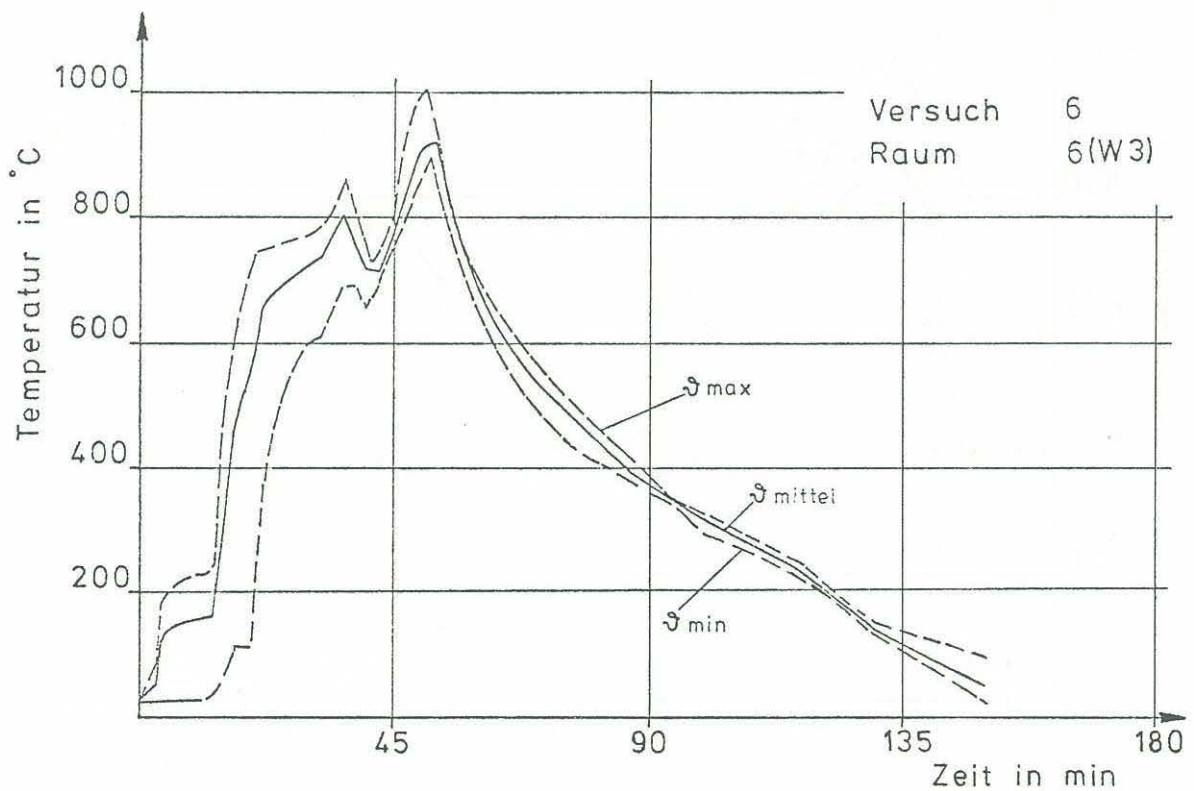


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 11
Kap. 6.1 Nr. 12

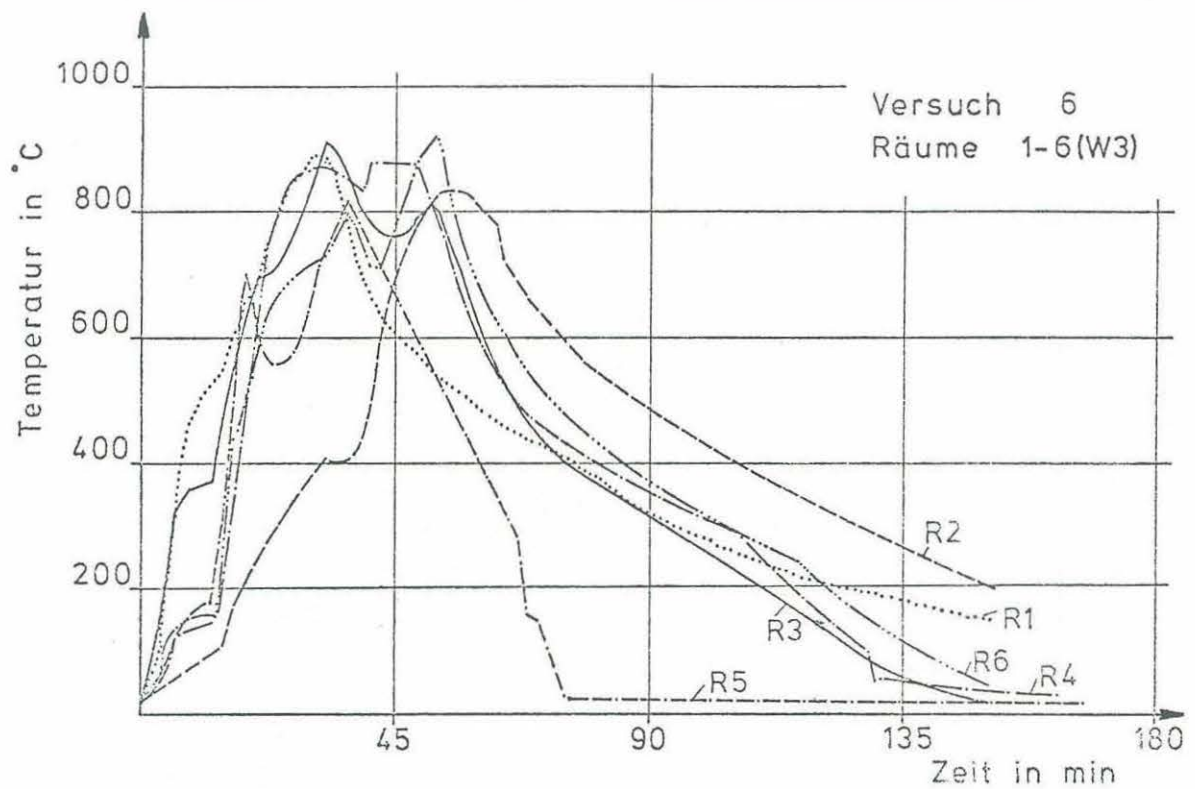


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

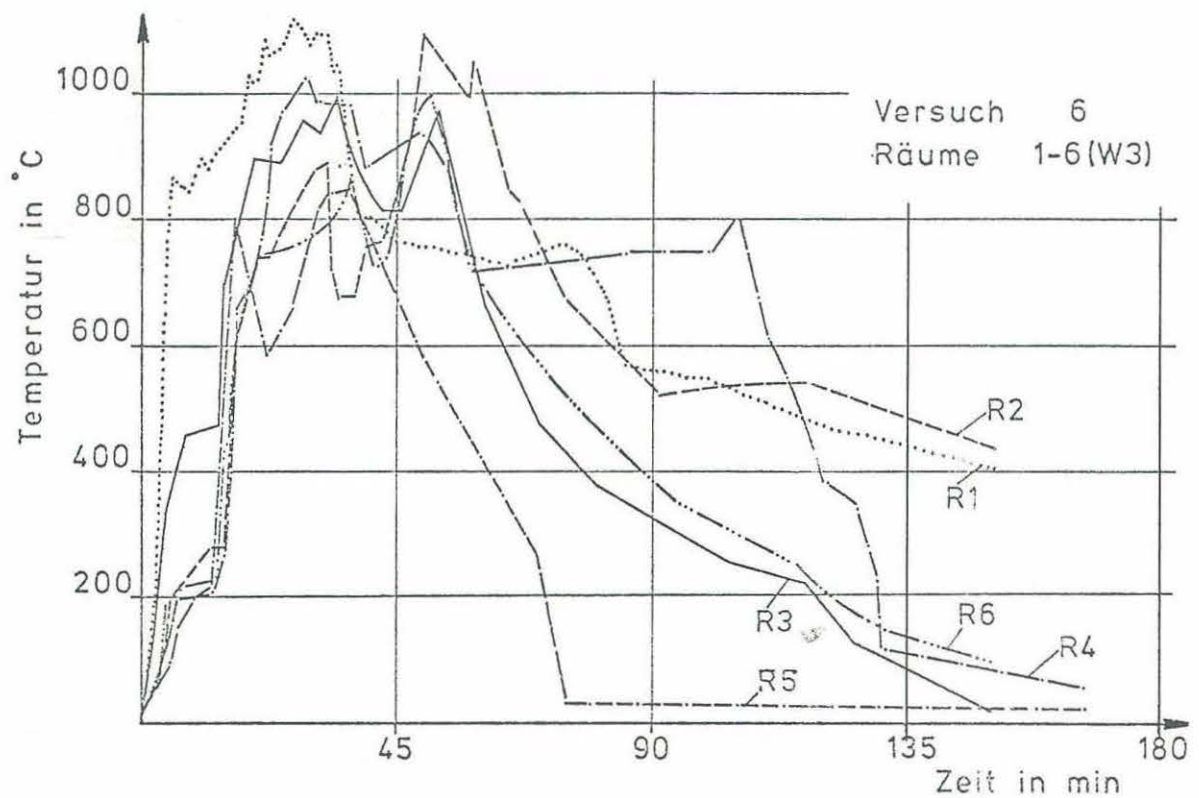


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 13
Kap. 6.1 Nr. 14

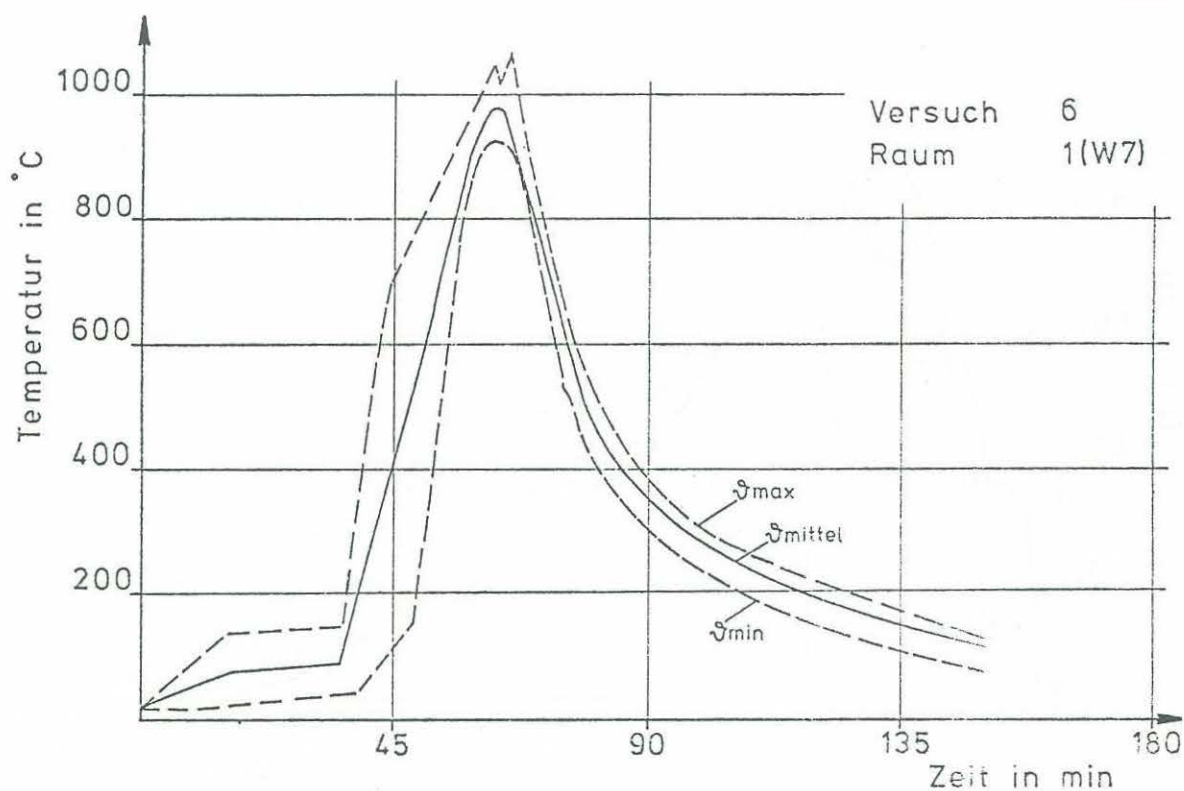


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

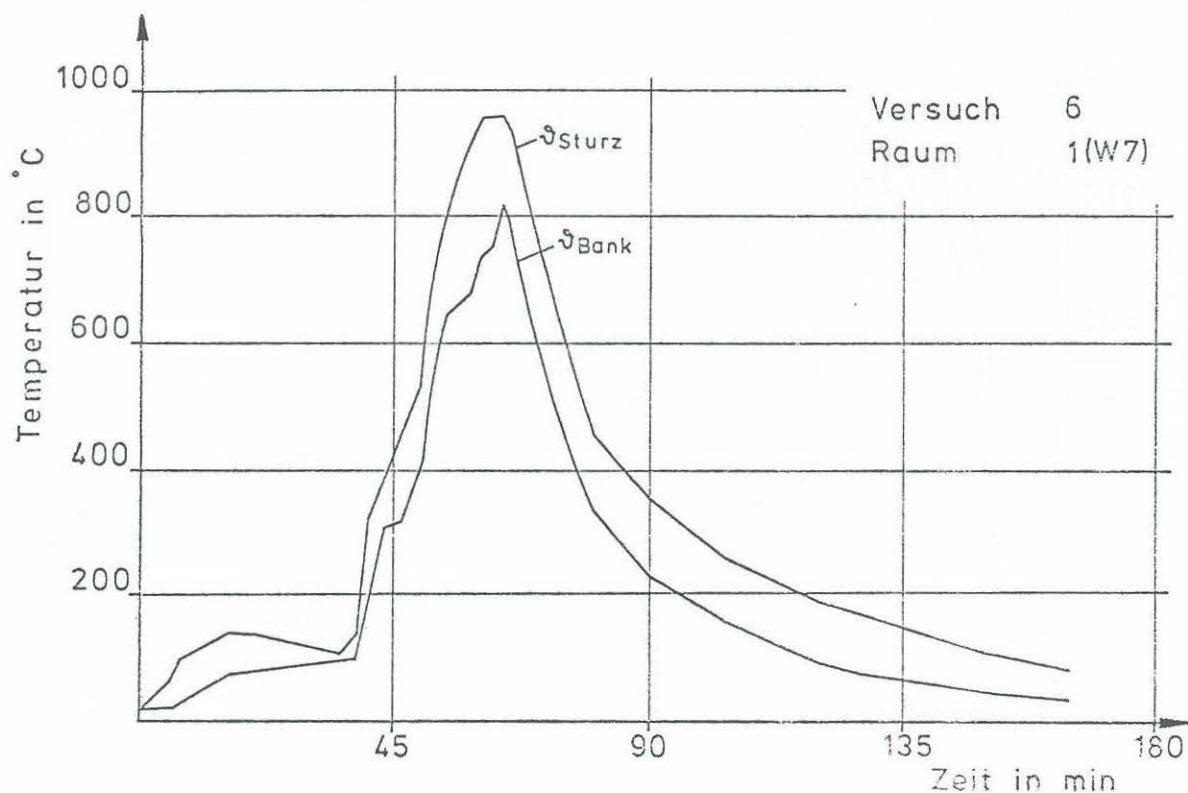


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (maximale Brandraumtemperaturen)

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 15
Kap. 6.1 Nr. 16

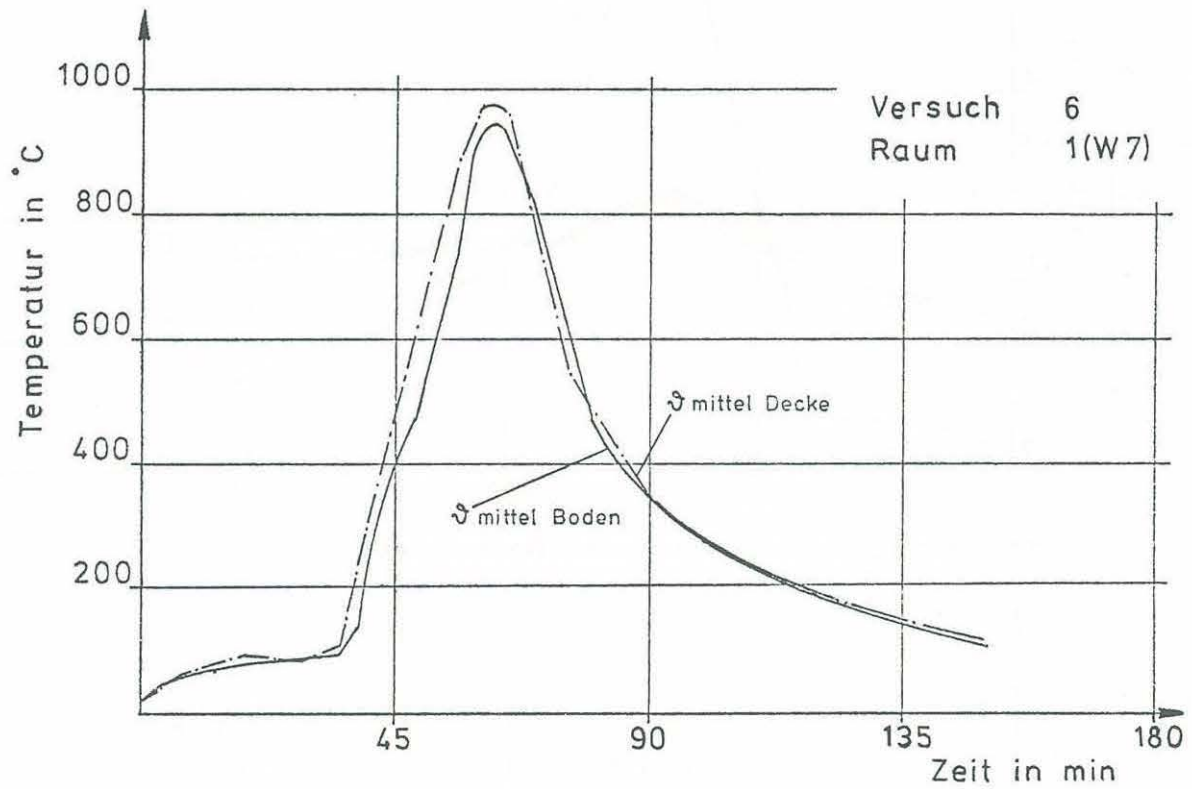


Temperaturstreibereich in einem Brandraum



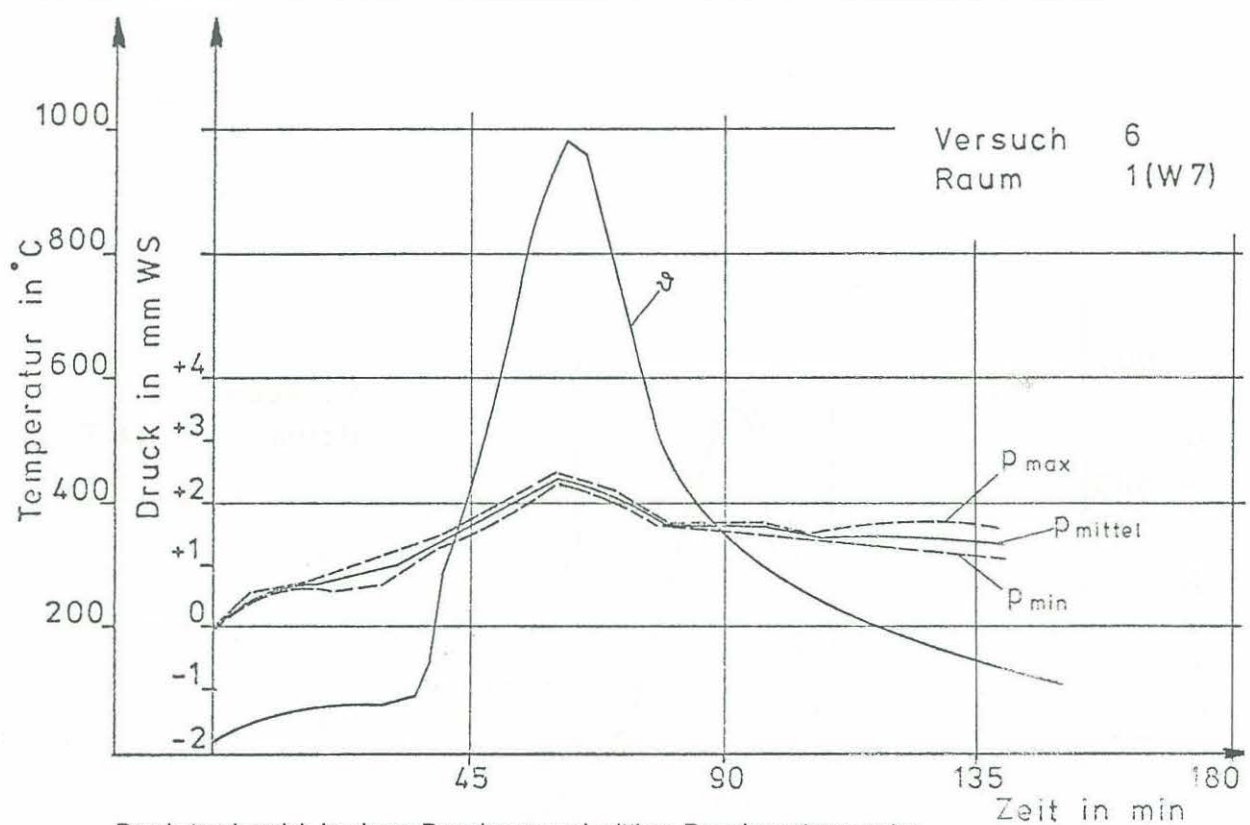
Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 17
Kap. 6.1 Nr. 18

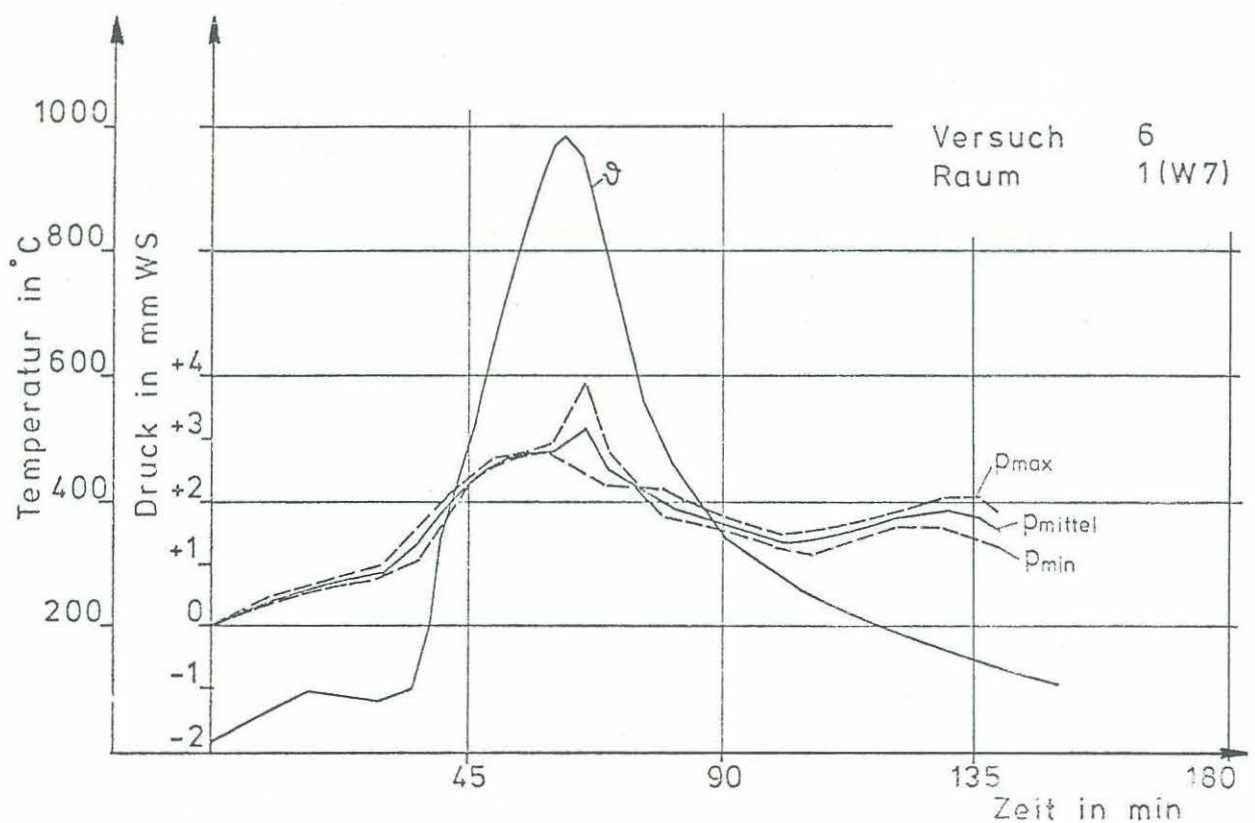


Temperaturschichtung gemessen in zwei horizontalen Ebenen

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 19

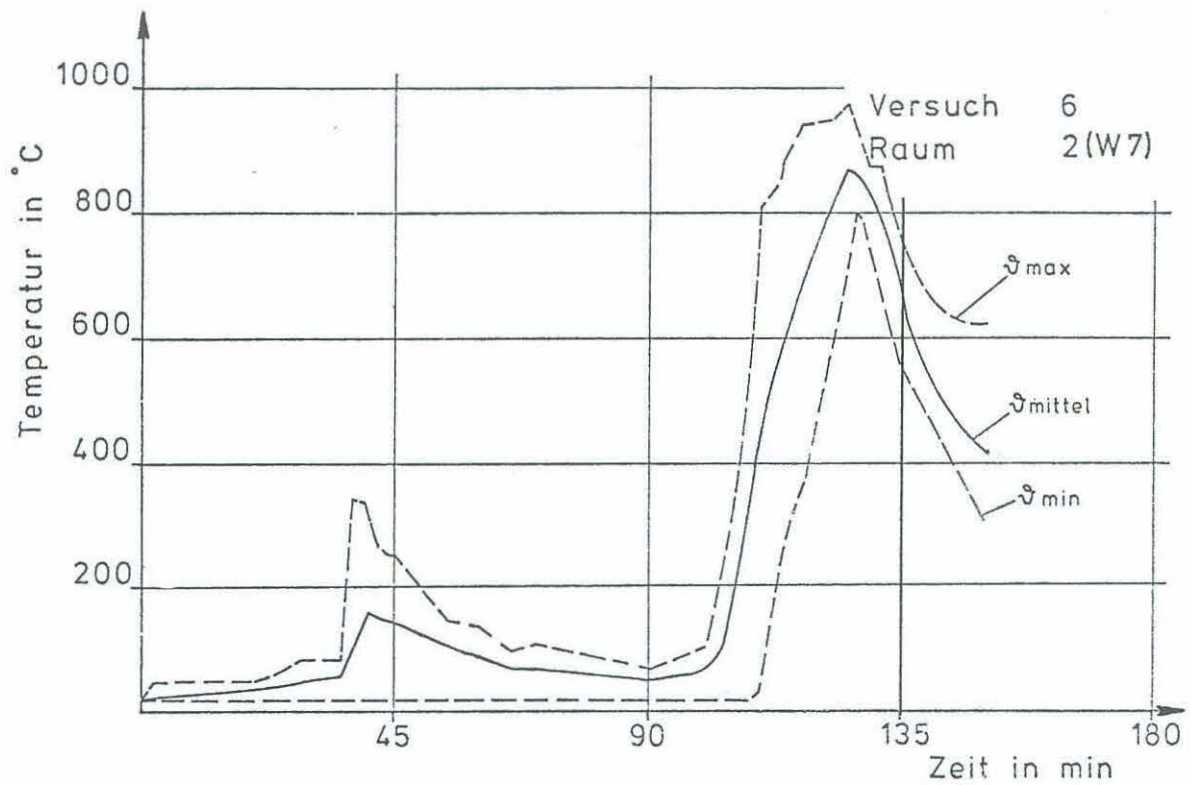


Druckstreibereich in einem Brandraum und mittlere Brandraumtemperatur

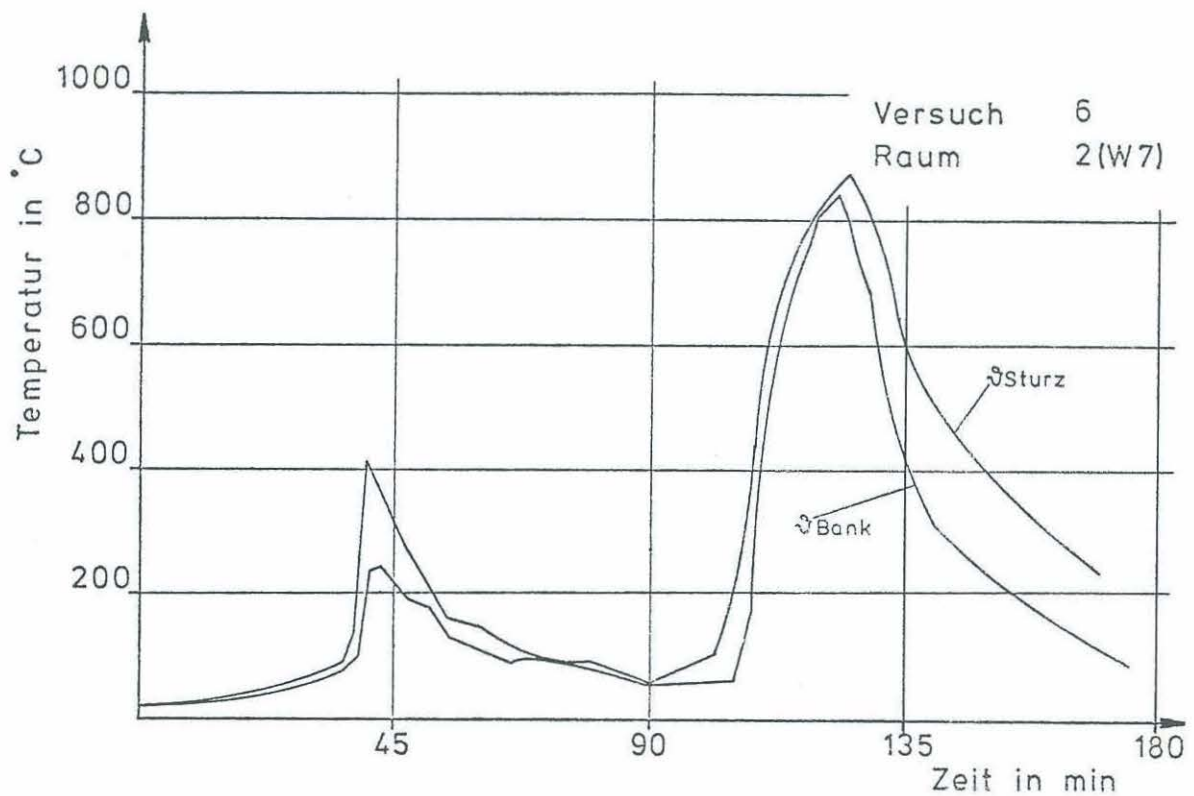


Druckstreibereich unter der Decke und mittlere Deckentemperatur

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 20
Kap. 6.1 Nr. 21

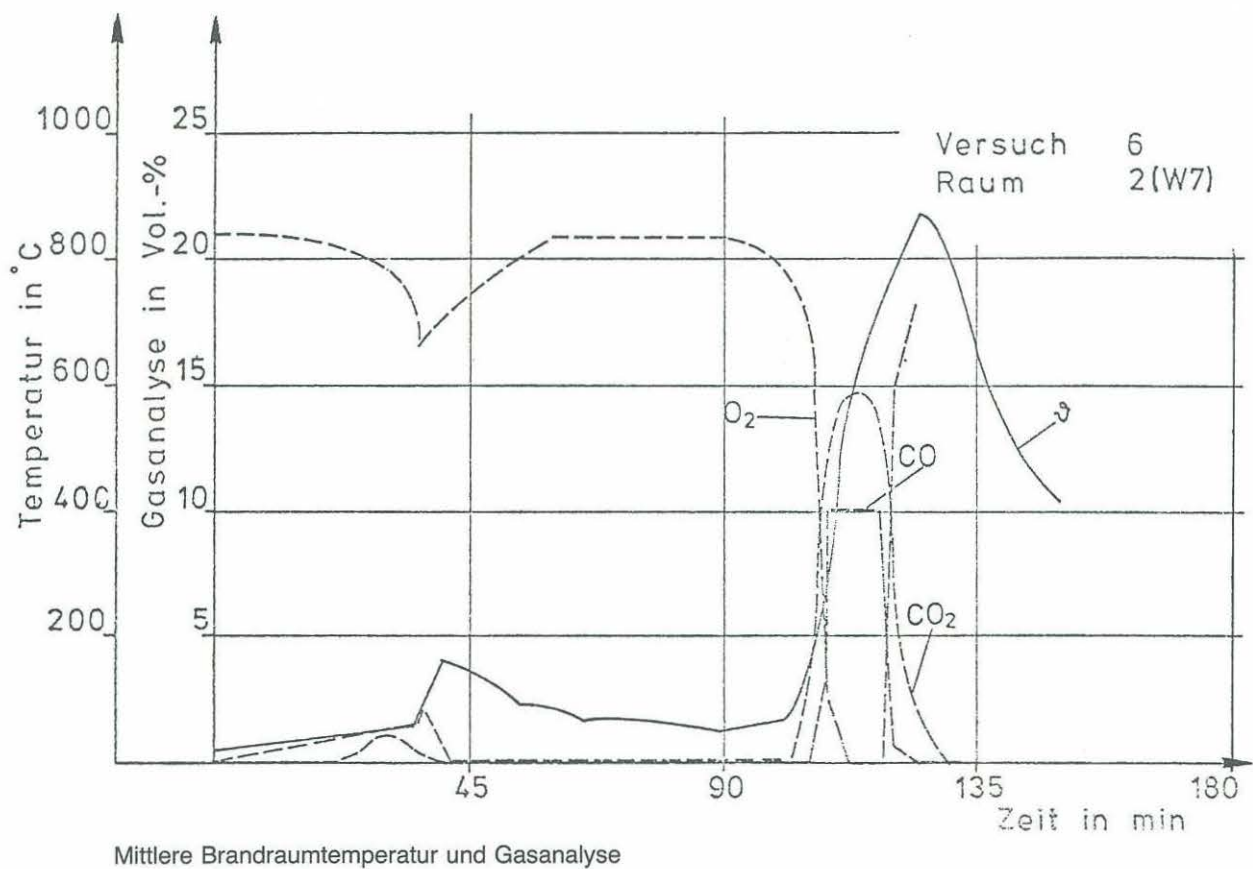
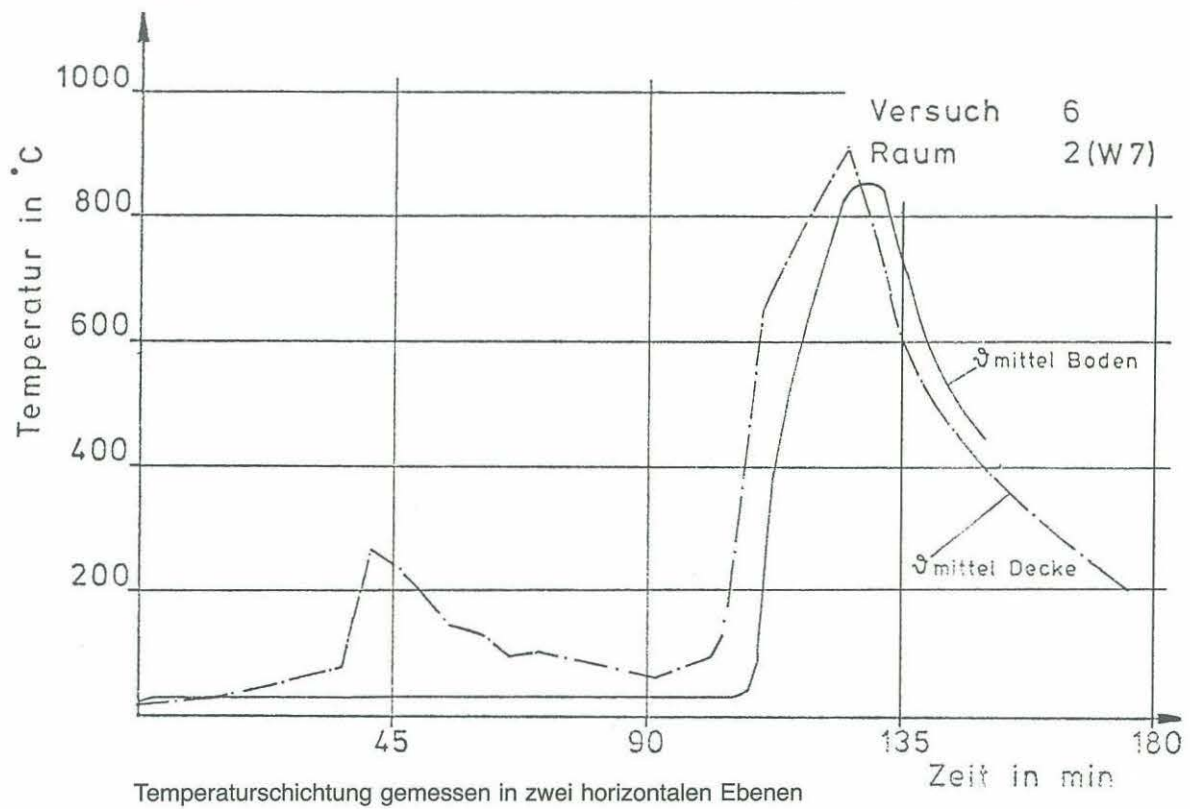


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

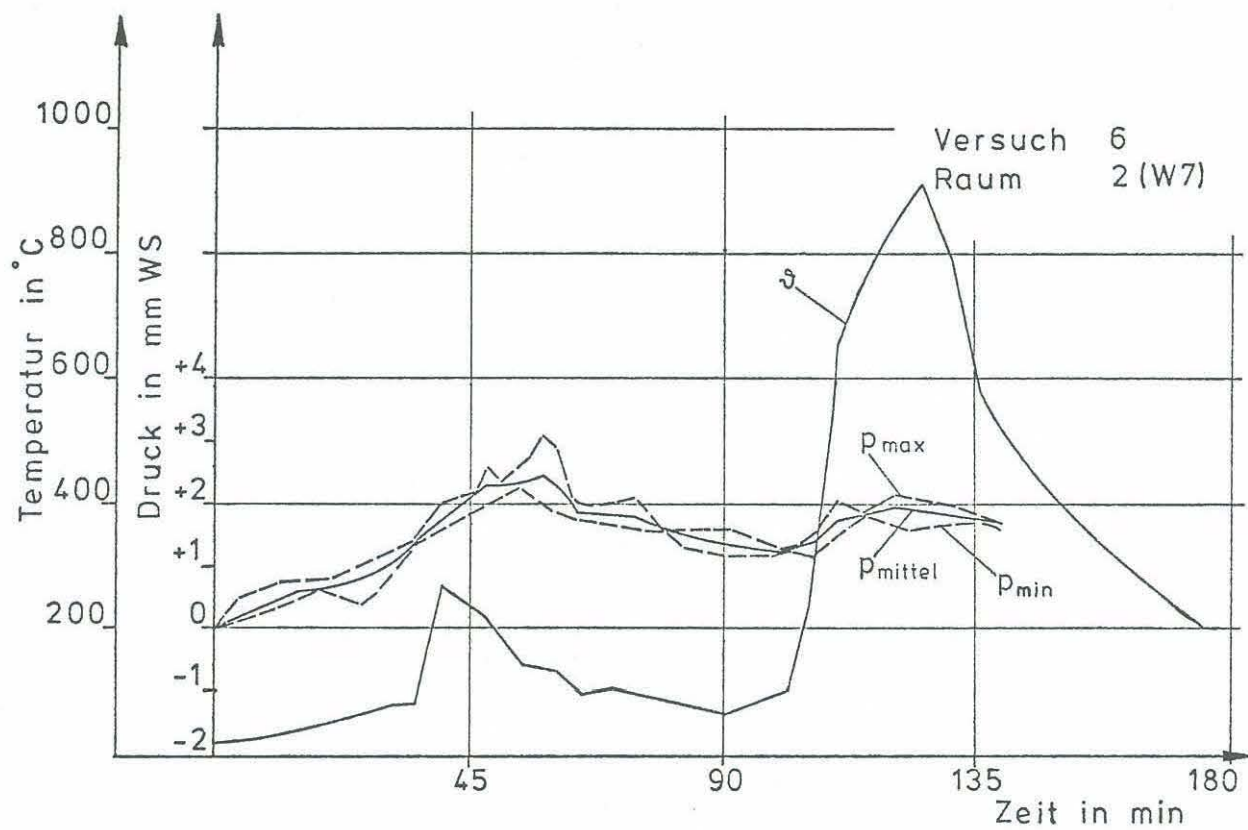


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

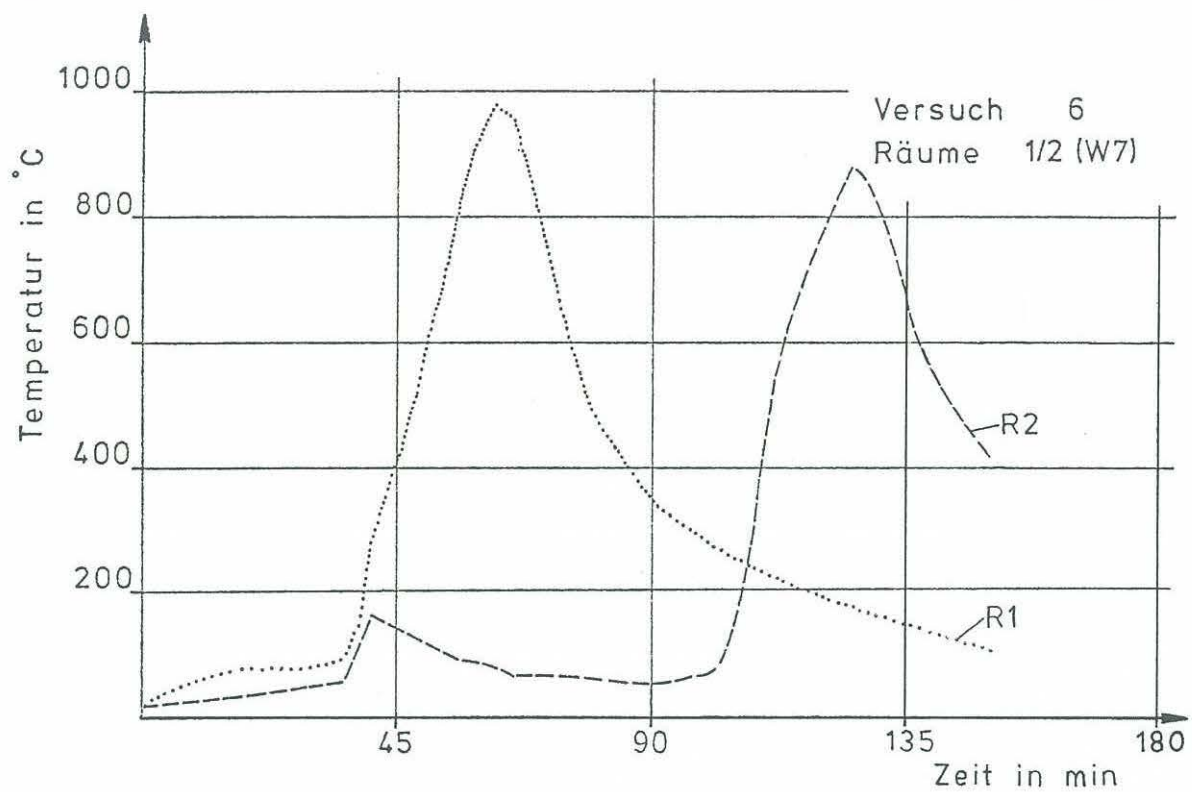
Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 22
Kap. 6.1 Nr. 23



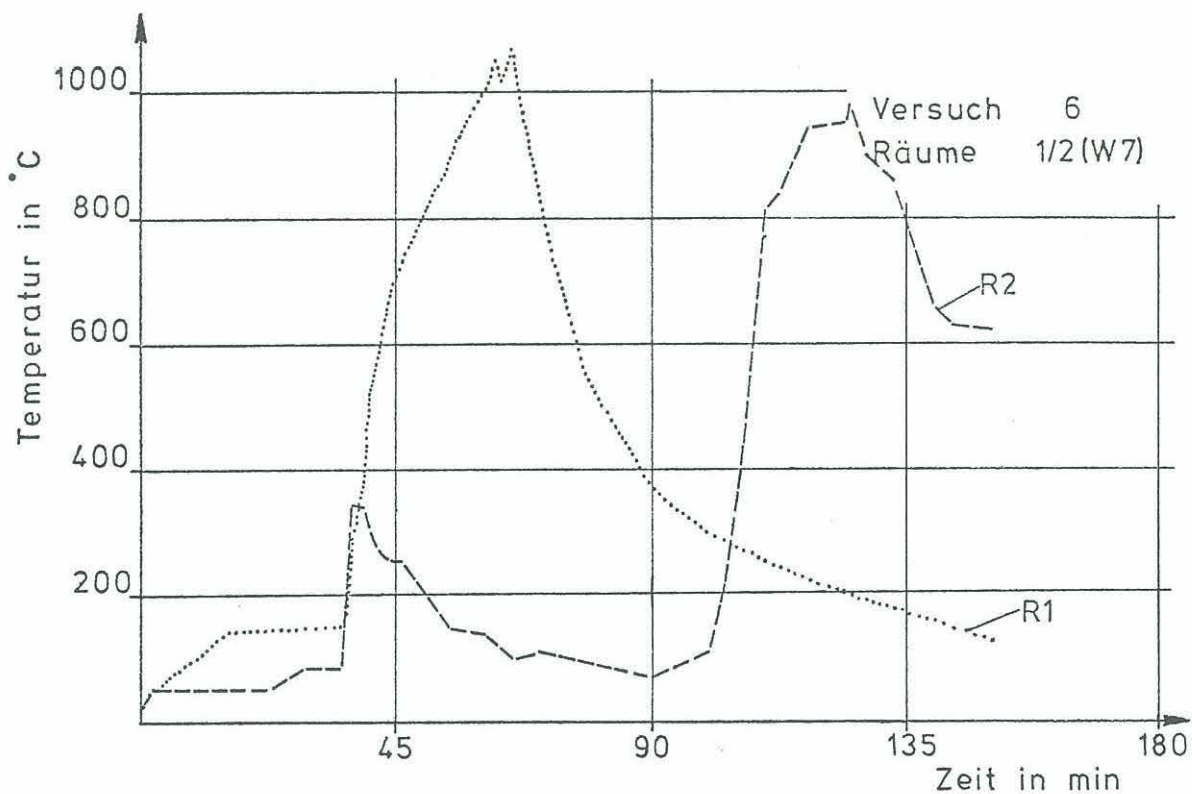
Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 24
Kap. 6.1 Nr. 25



Druckstreibereich unter der Decke und mittlere Deckentemperatur

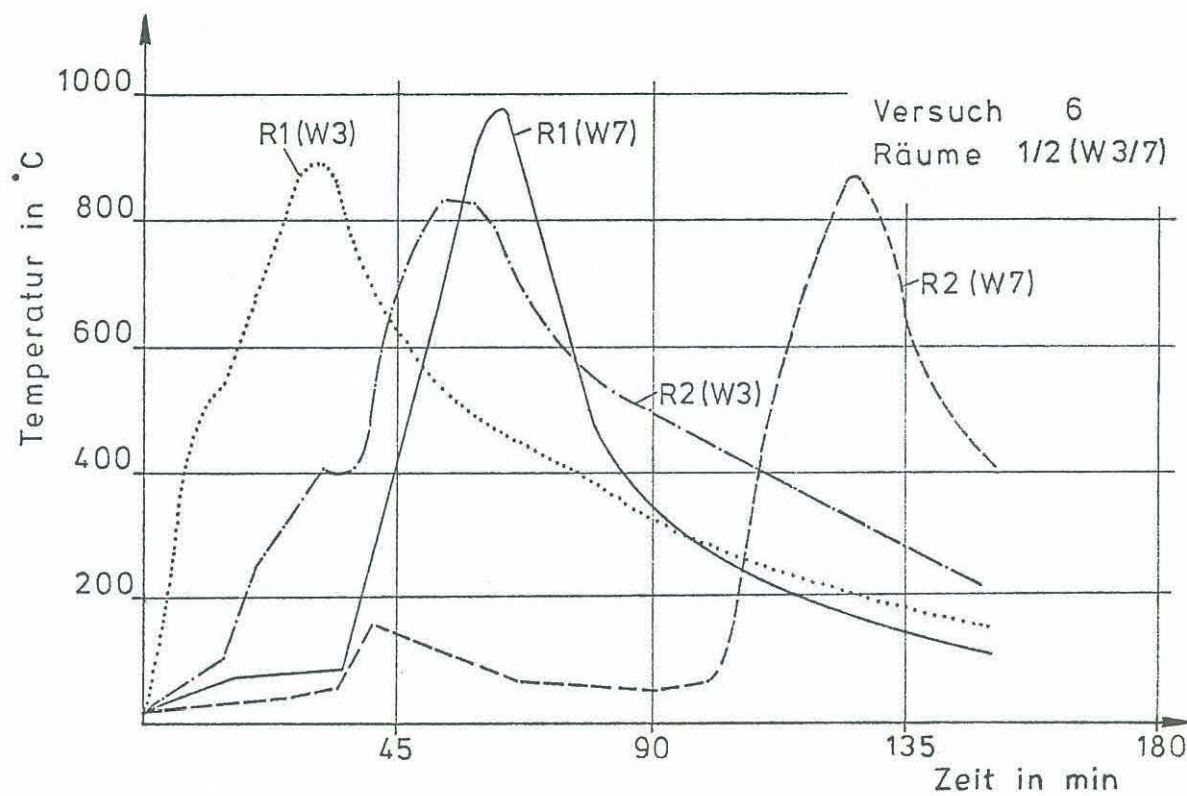


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperaturen)

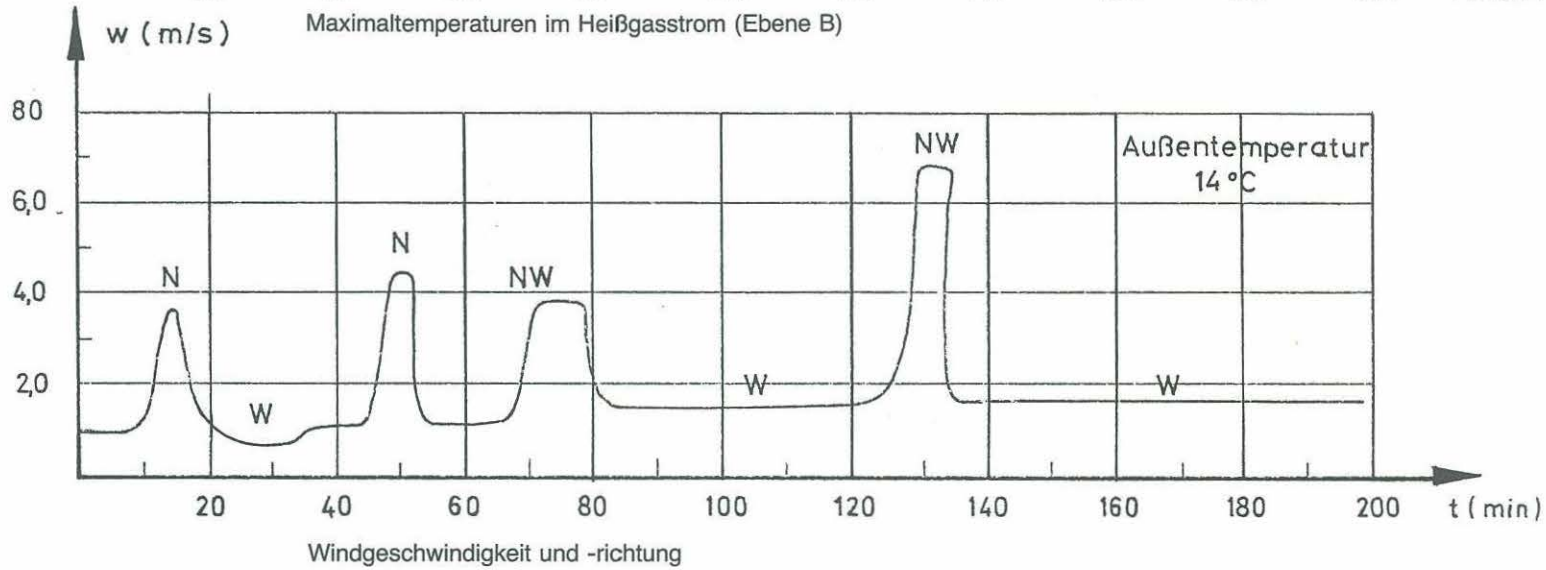
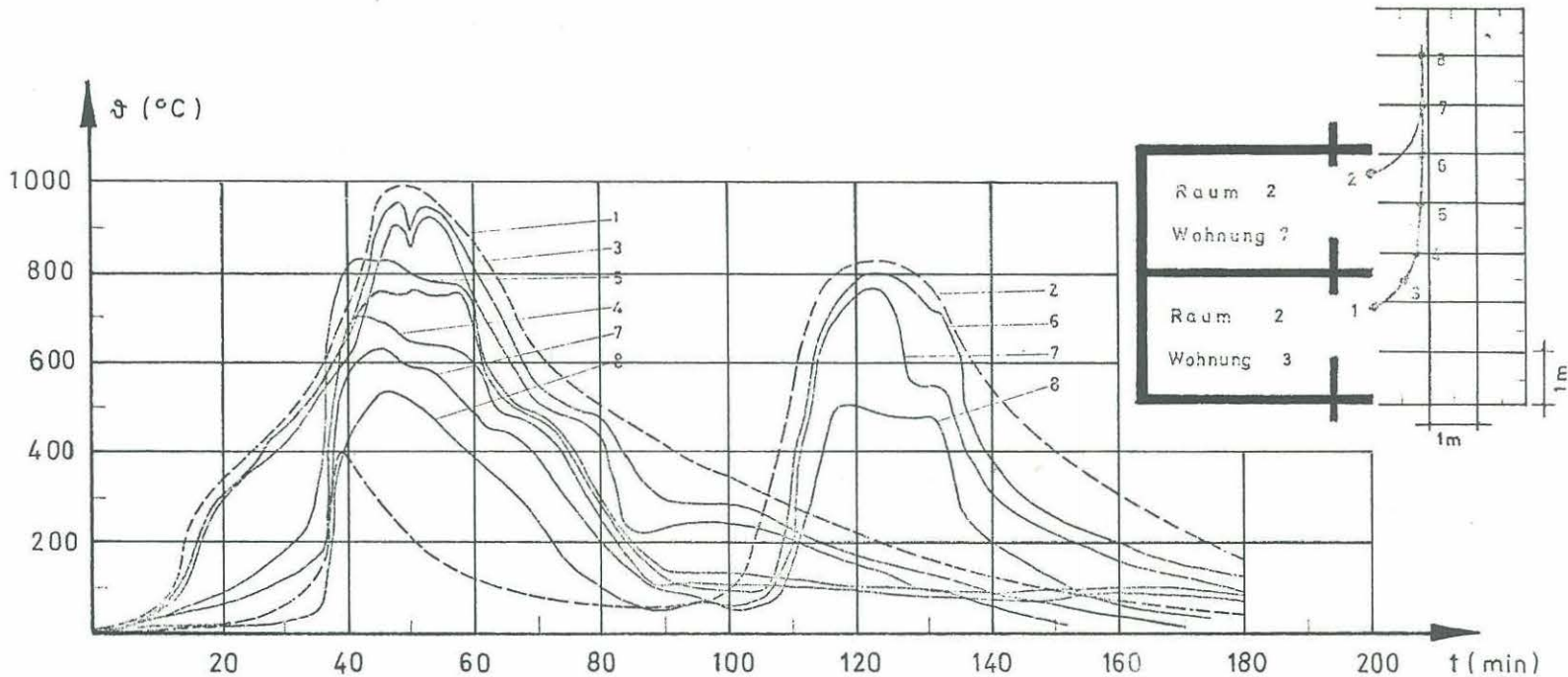


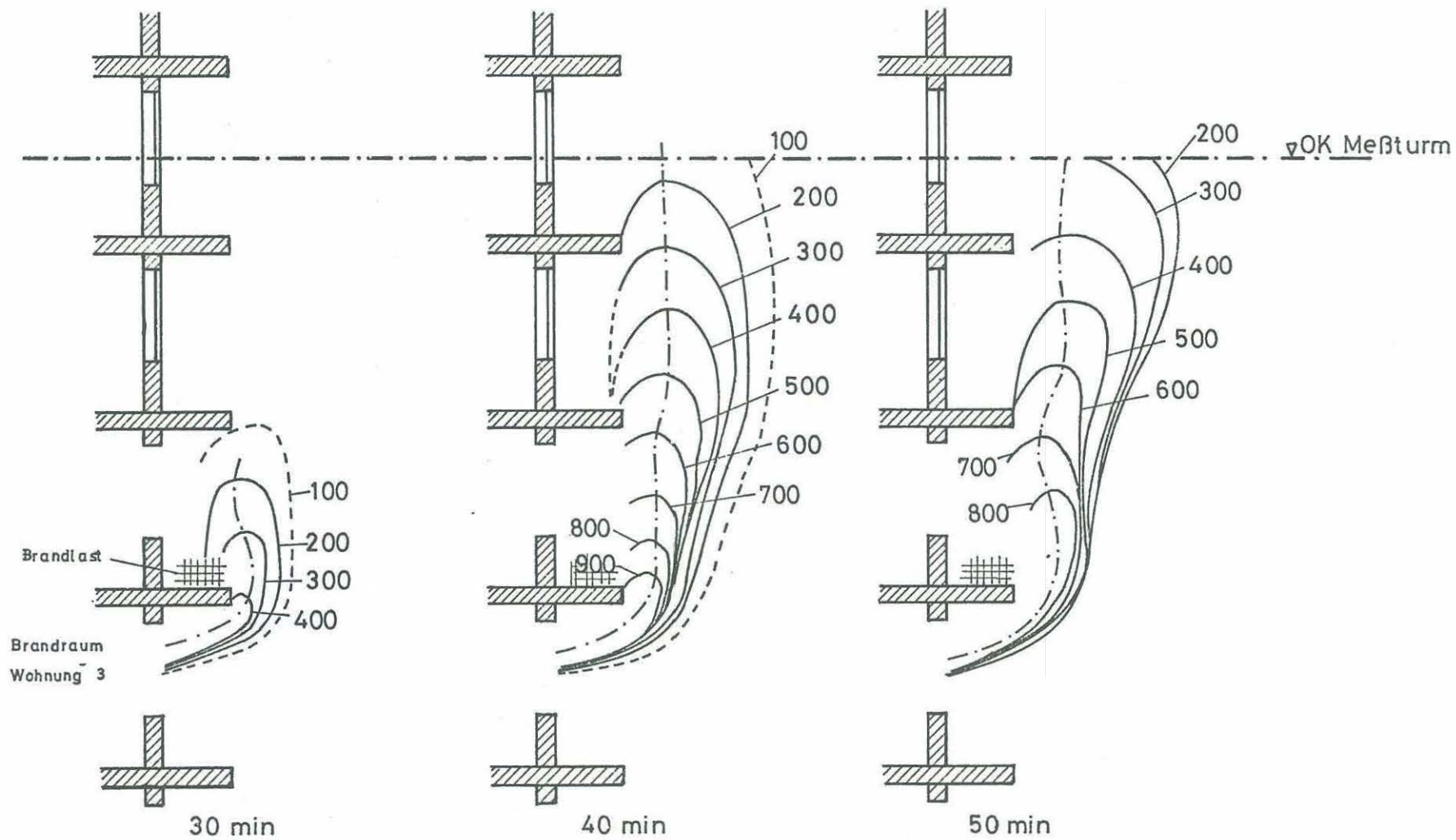
Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (maximale Brandraumtemperaturen)

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.1 Nr. 27
Kap. 6.1 Nr. 28



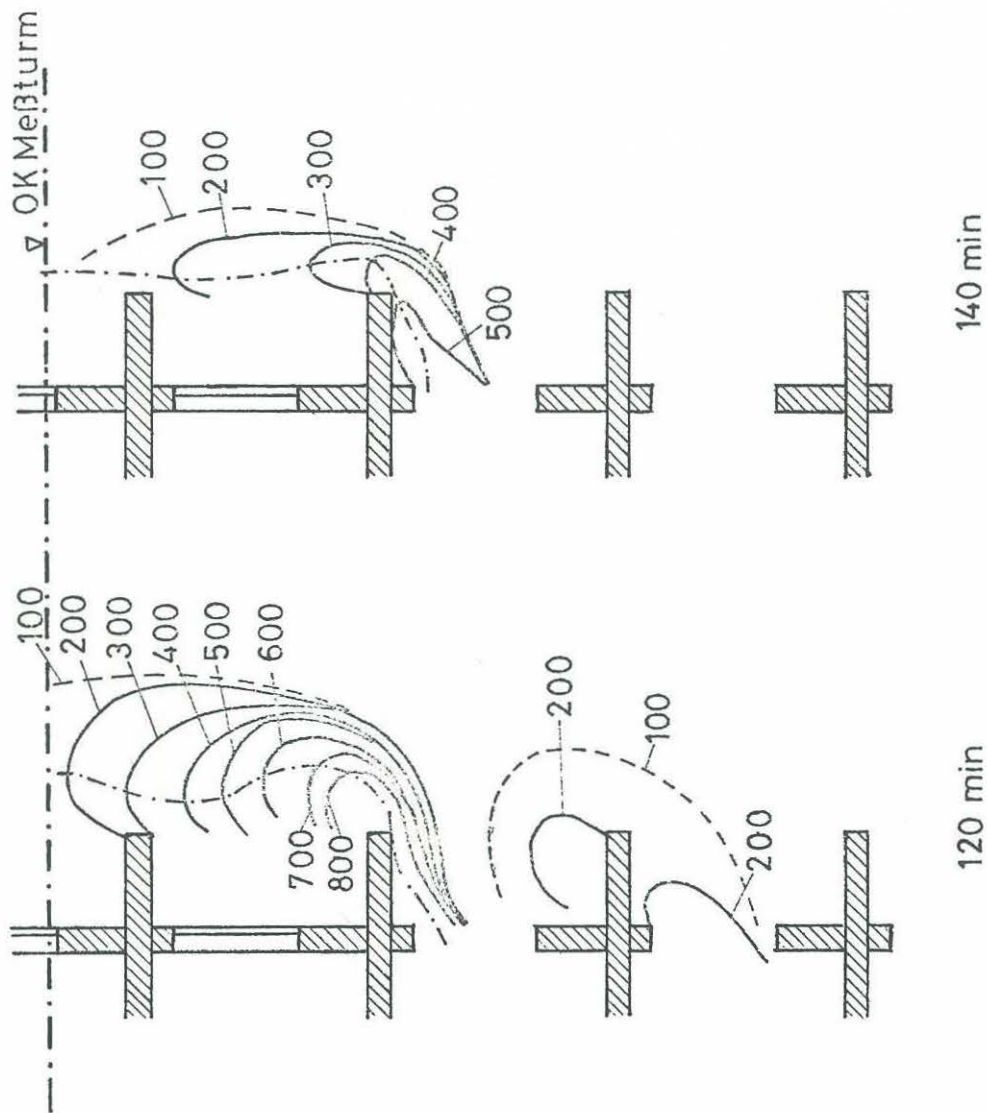
Feuerübersprung von Stockwerk zu Stockwerk (mittlere Brandraumtemperaturen)



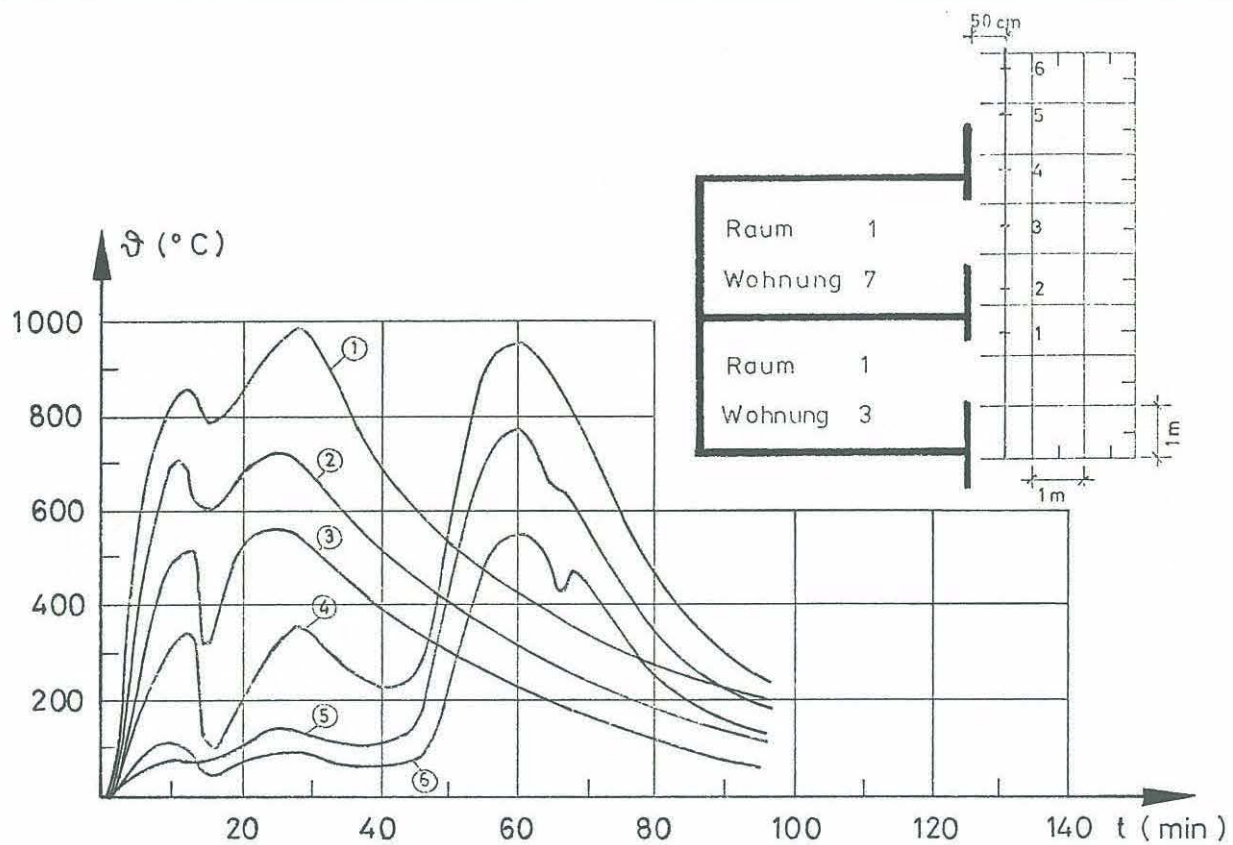


Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Ebene B)

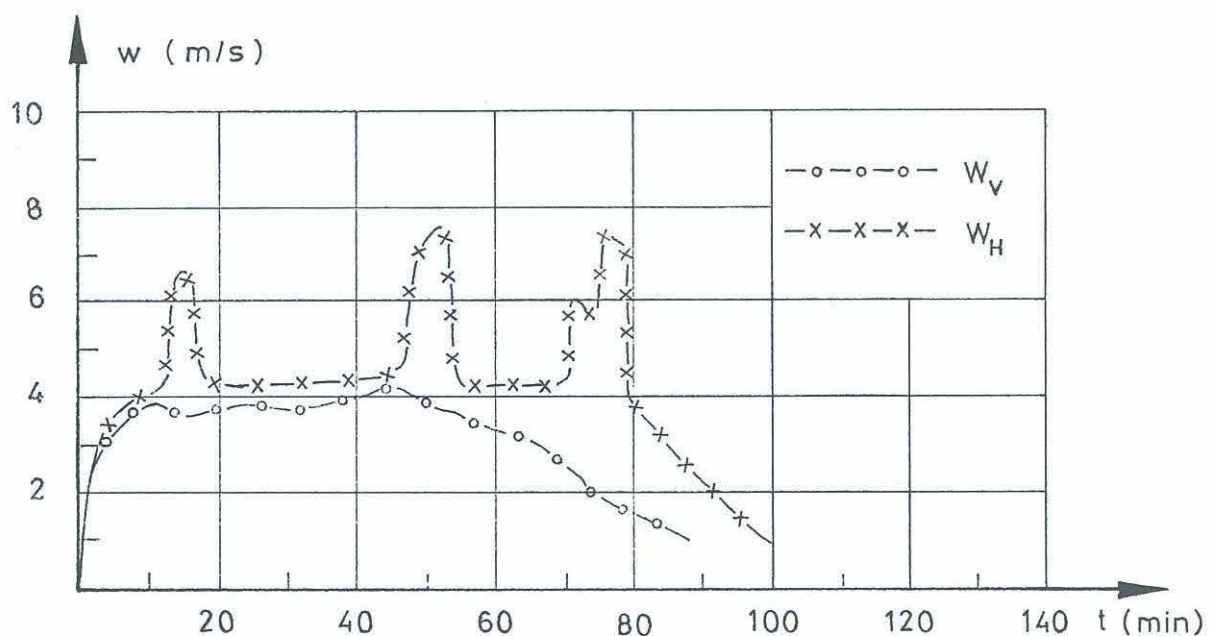
Anlage zum Versuch
Nr. 2



Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Ebene B)



Temperaturen im Heißgasstrom vor der Fassade auf einer senkrechten Geraden ca. 50 cm vor der Frontwand (10 cm neben der Außenstütze IPB 240)

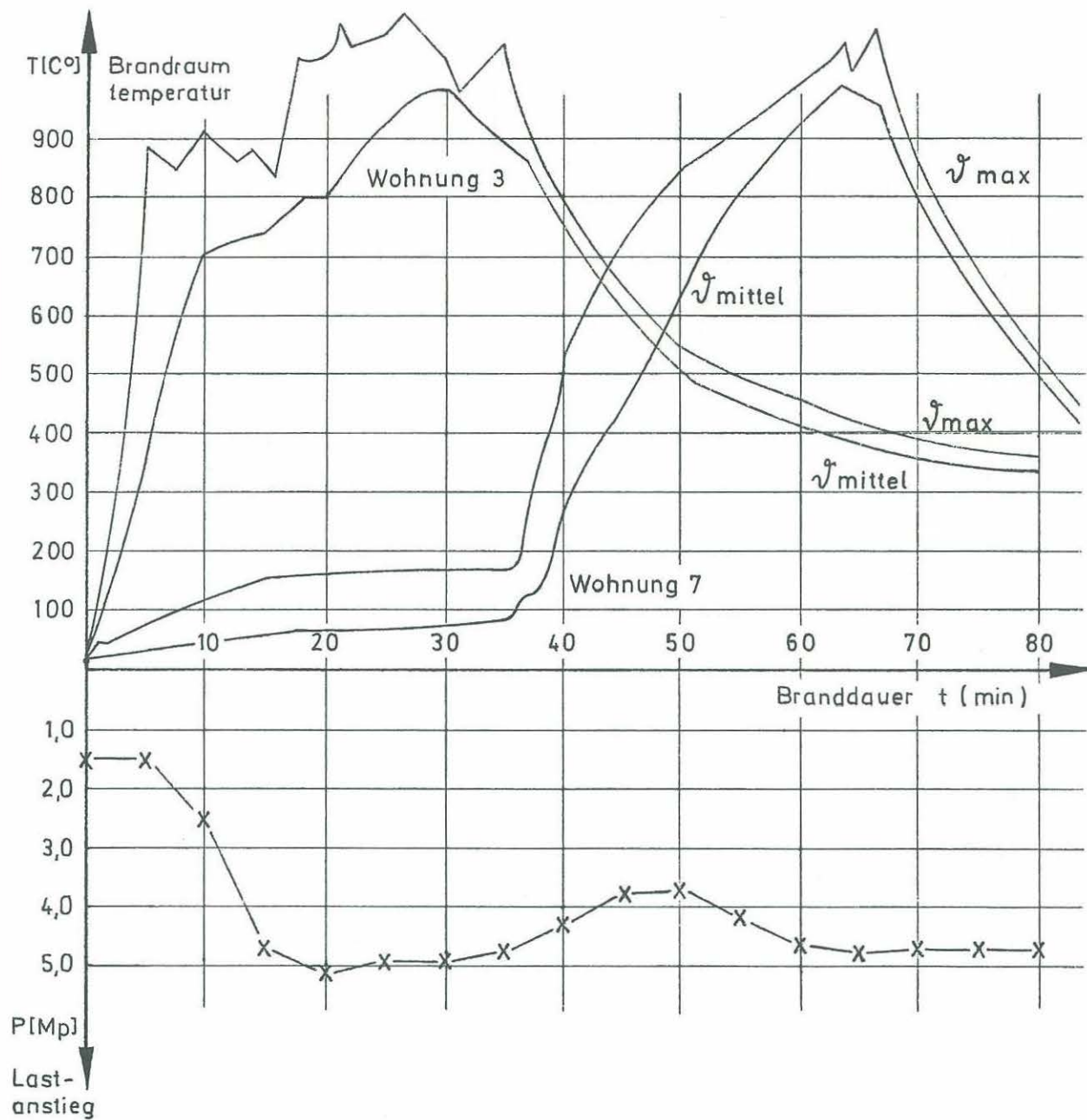


Verlauf der Heißgasgeschwindigkeit

W_H = horizontale Geschwindigkeit 20 cm unter der OK Brandraumfenster Whg. 3

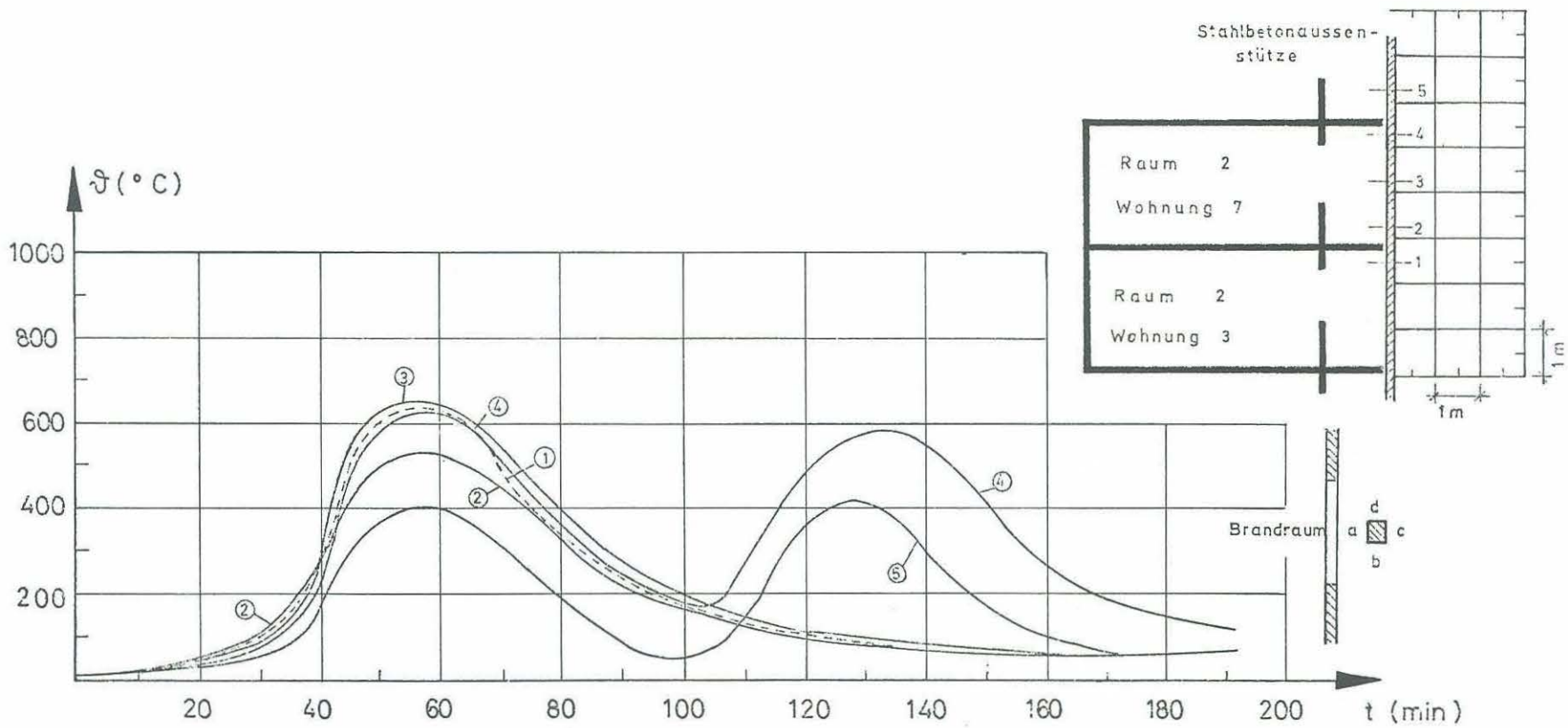
W_V = vertikale Geschwindigkeit 1,5 m über OK Brandraumfenster Whg. 3

Anlage zum Versuch 6
Kap. 6.2 Nr. 4



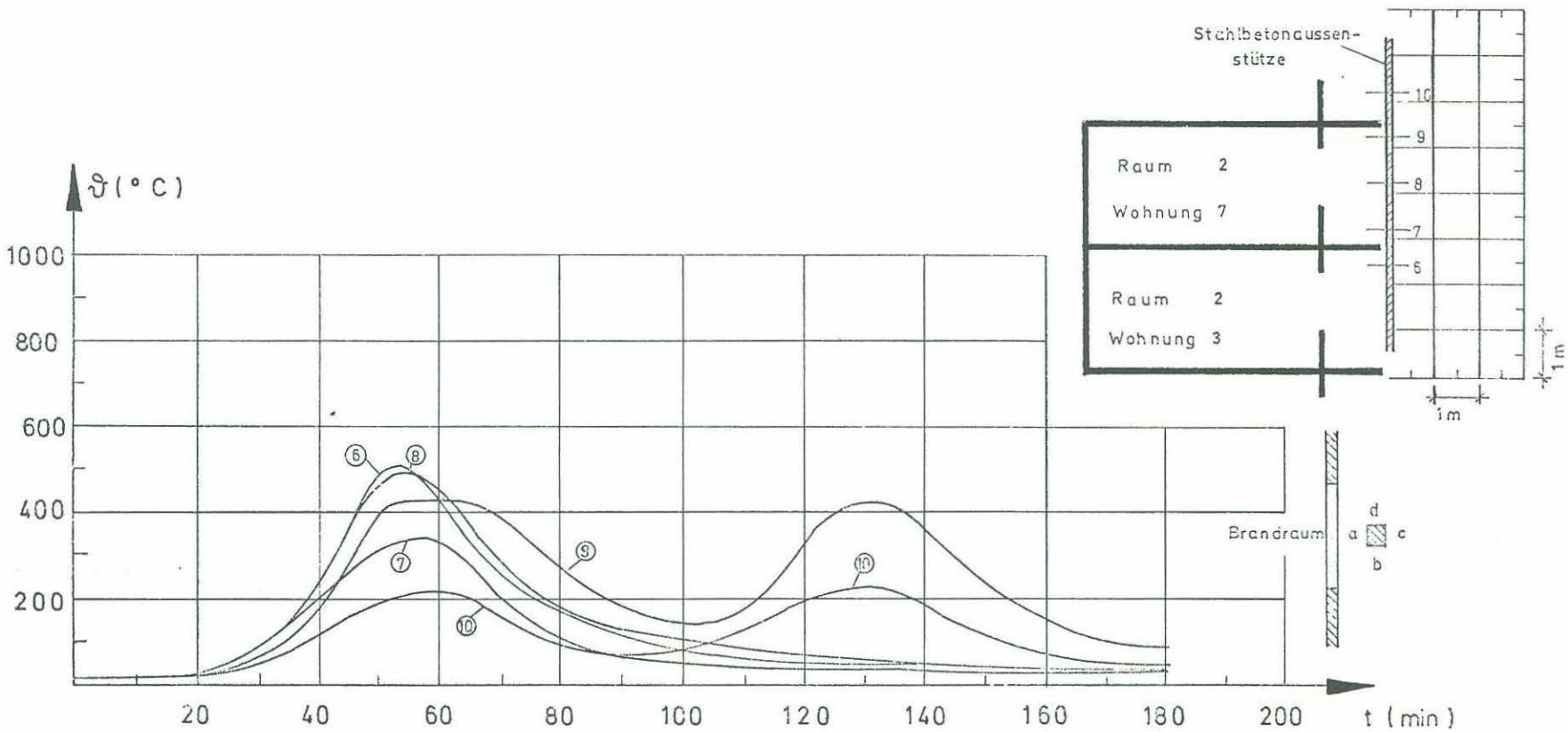
Lastabtragung auf 24 cm Wand zwischen Wohnung 3 und 4
und Brandraumtemperaturen in Wohnung 3 und 7

Anlage zum Versuch 6
Kap. 7.2 Nr. 1

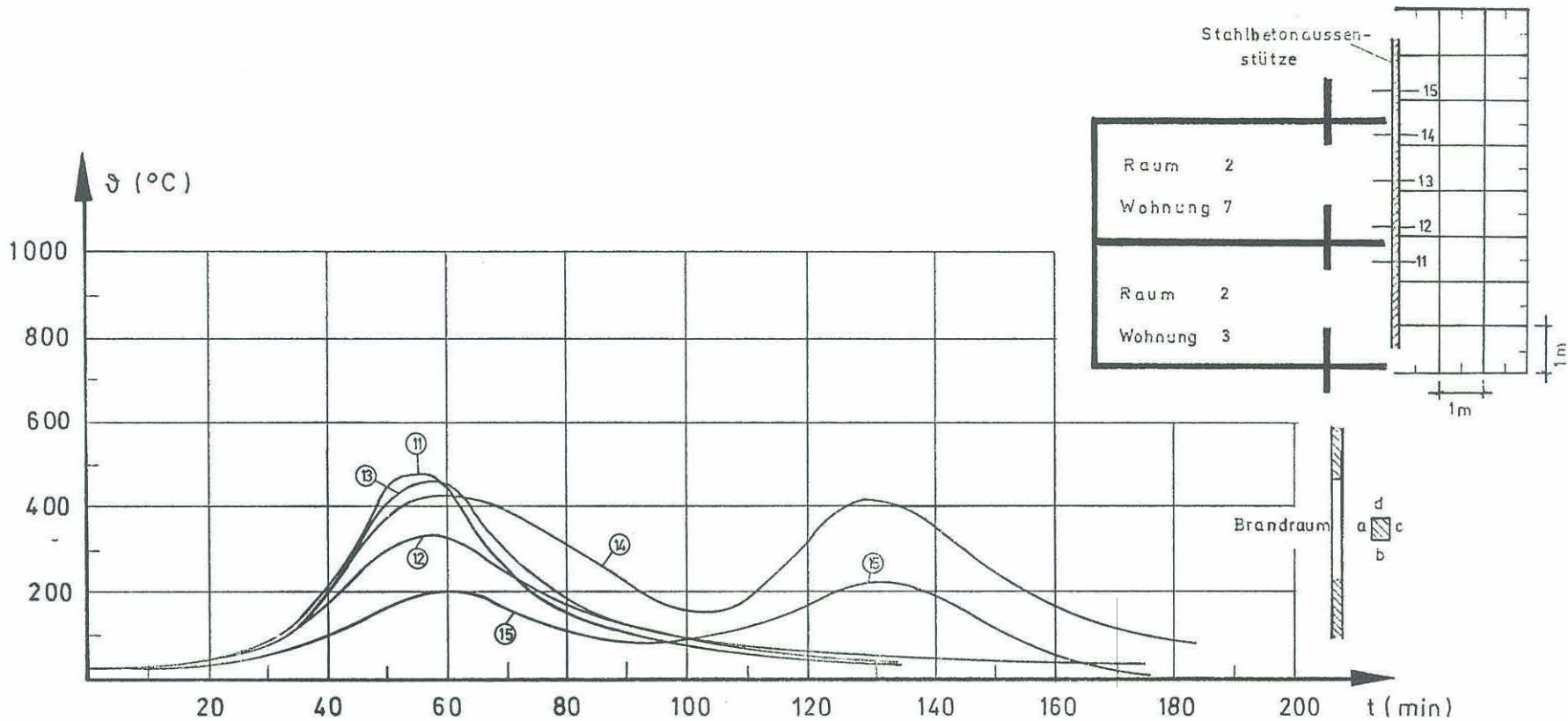


Temperaturverlauf an der dem Brandraum zugekehrten Oberfläche a der Stahlbetonaußenstütze

Anlage zum Versuch
Nr. 1 6
Kap. 8.4

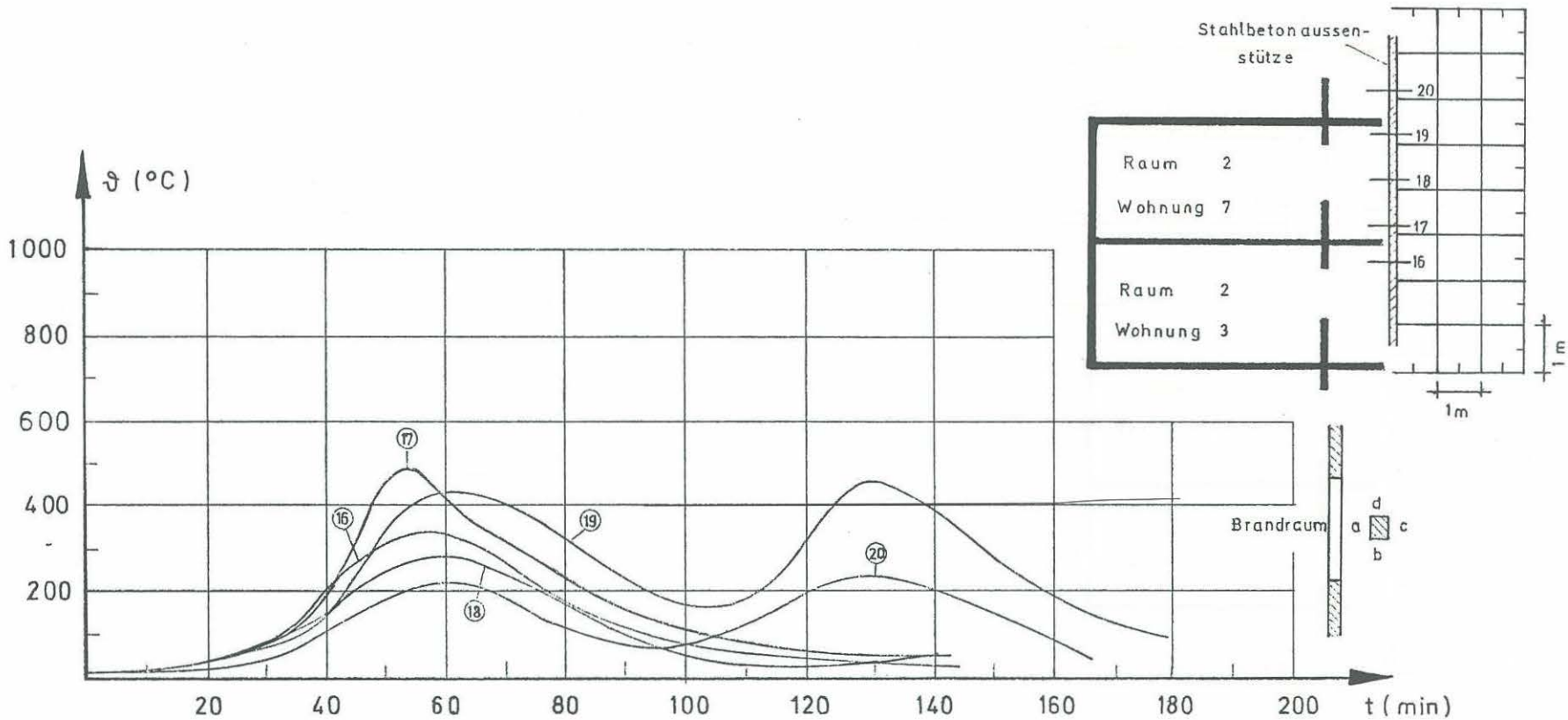


Temperaturverlauf an der Oberfläche b (rechtwinklig zur Frontwand) der Stahlbetonaussenstütze



Temperaturverlauf an der Oberfläche d (rechtwinklig zur Frontwand) der Stahlbetonaussenstütze

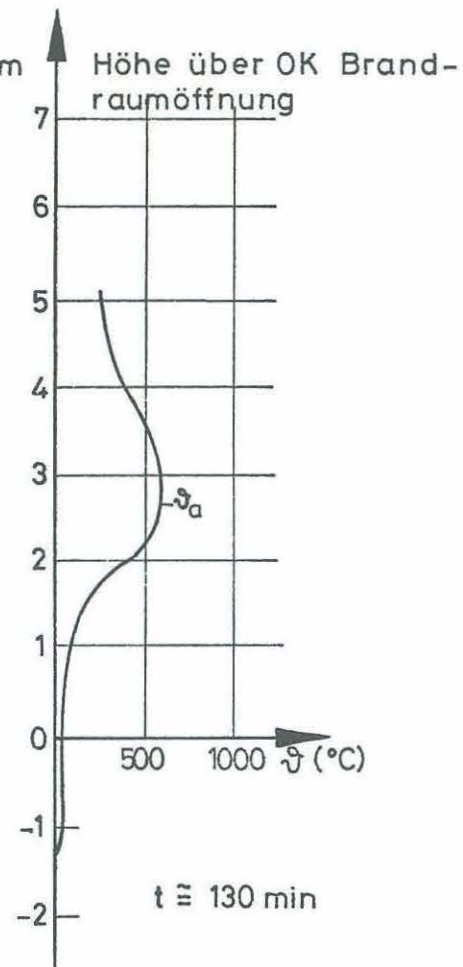
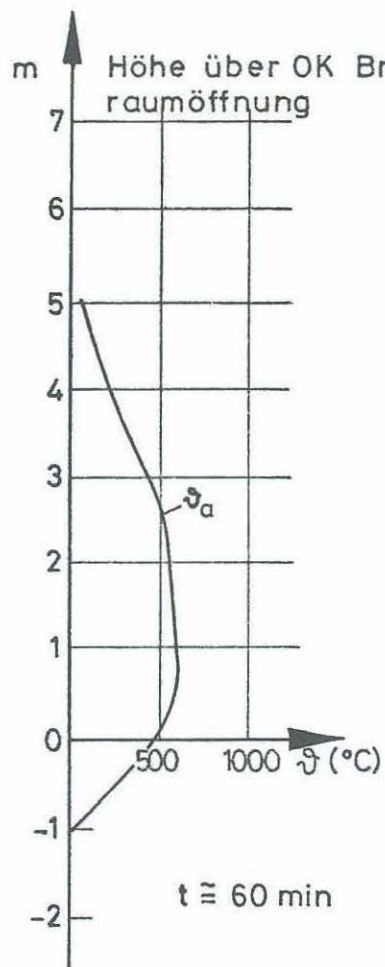
Anlage zum Versuch
Nr. 3



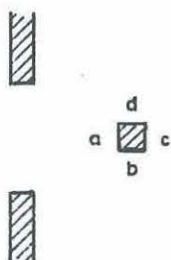
Temperaturverlauf an der dem Brandraum abgekehrten Oberfläche c der Stahlbetonaußenstütze

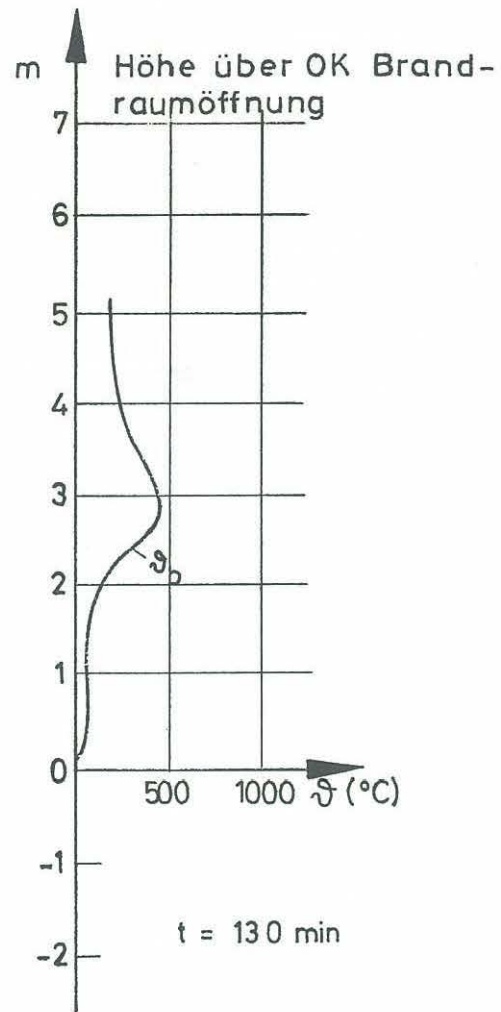
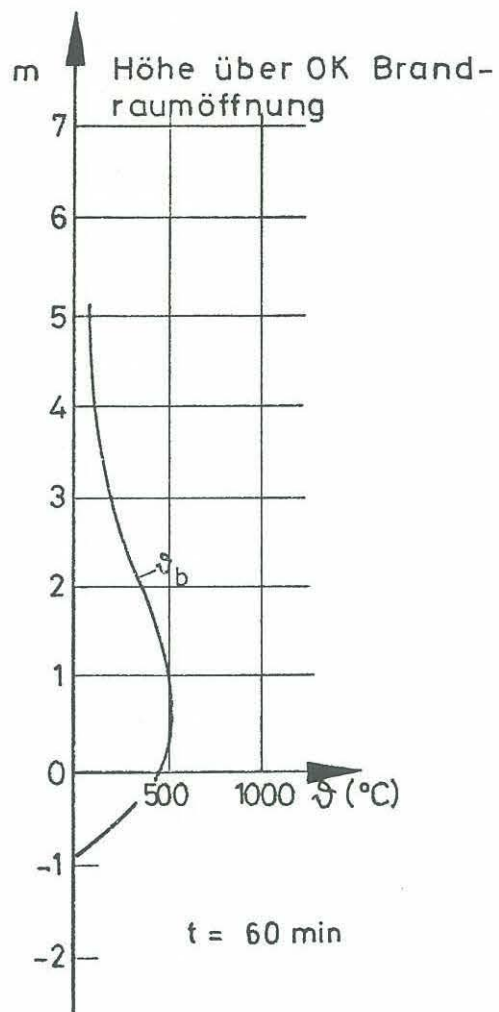
Anlage zum Versuch
Nr. 4

6

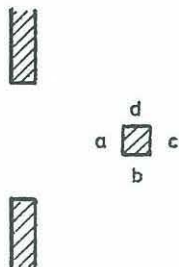


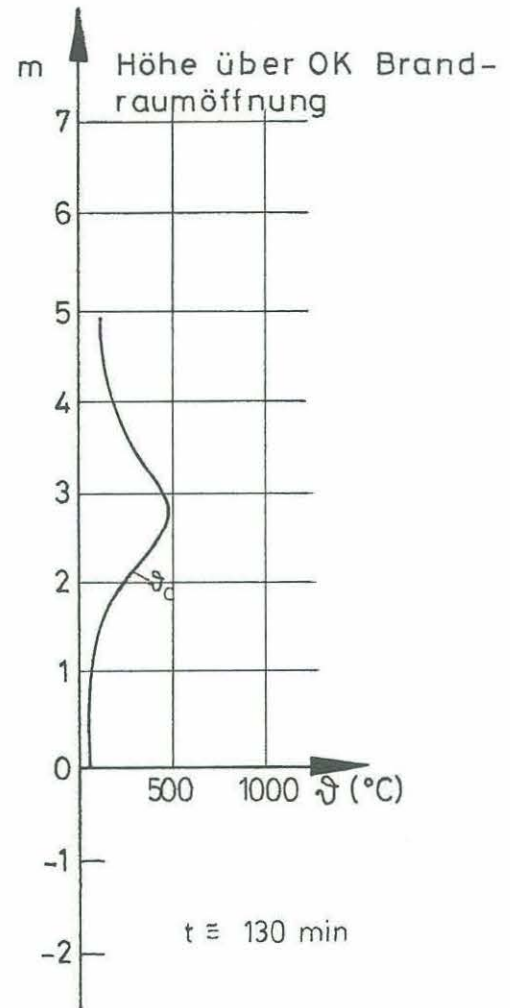
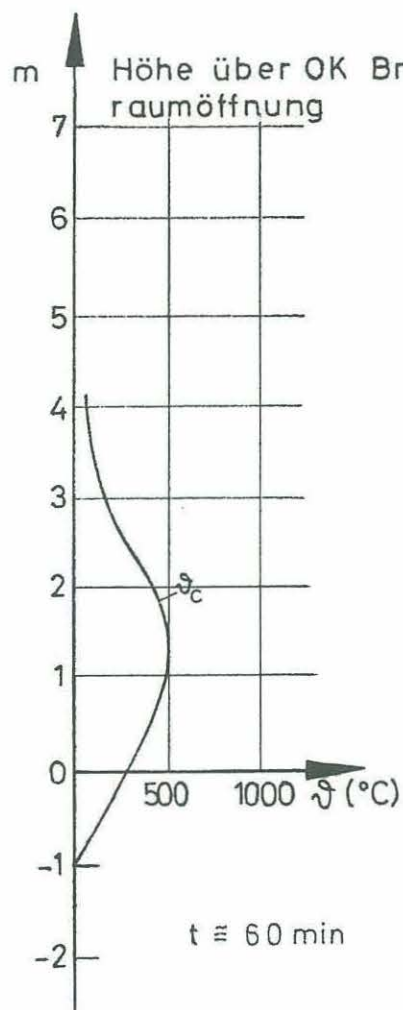
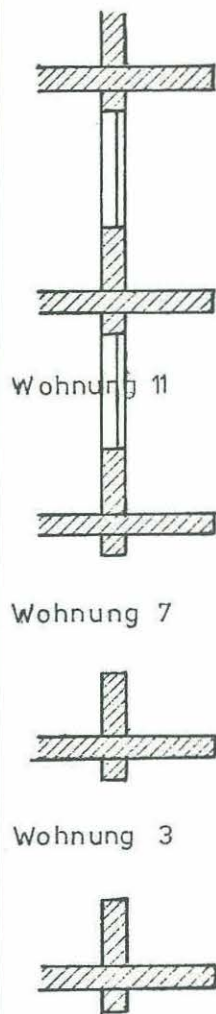
Maximale Oberflächentemperaturen der Stahlbetonaußenstütze
an der dem Brandraum zugekehrten Seite a



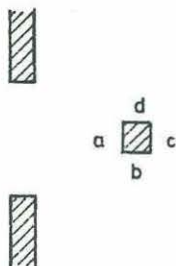


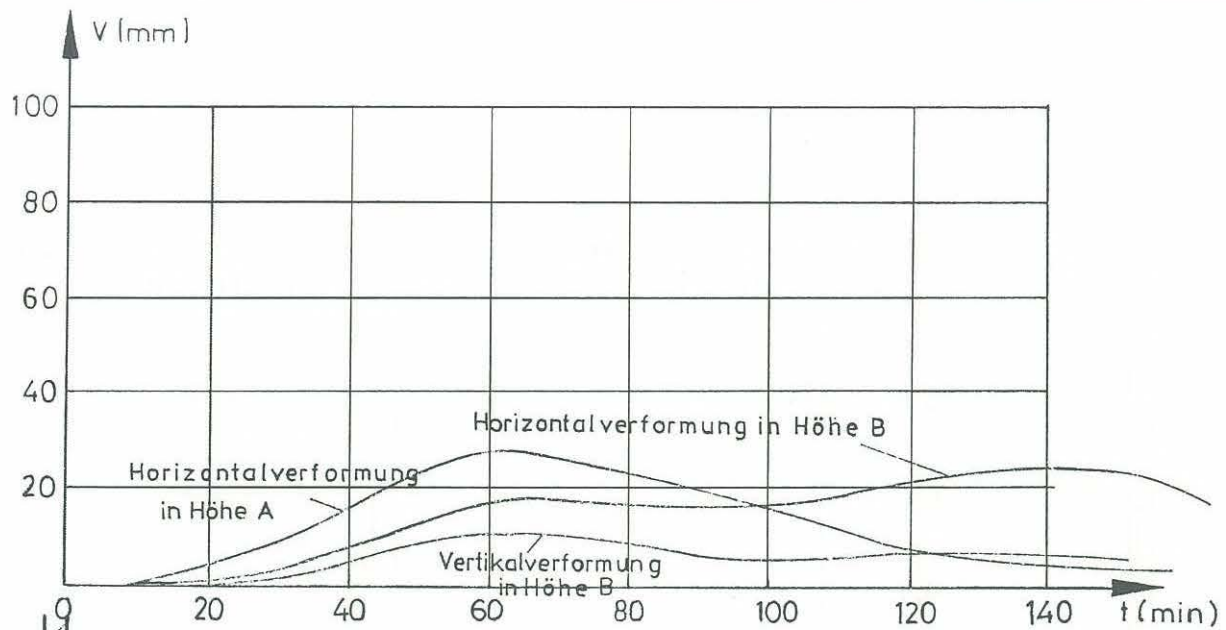
Maximale Oberflächentemperaturen an der Seite b (rechtwinklig zur Frontwand)
der Stahlbetonaußenstütze



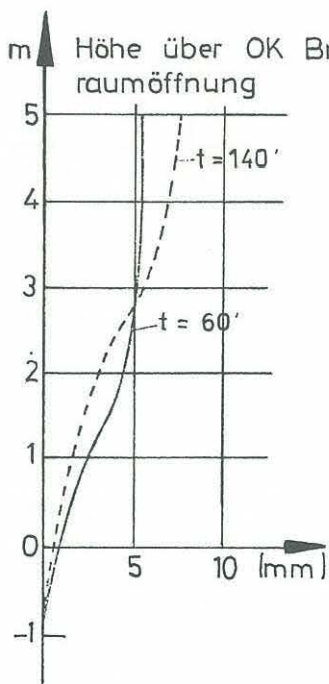
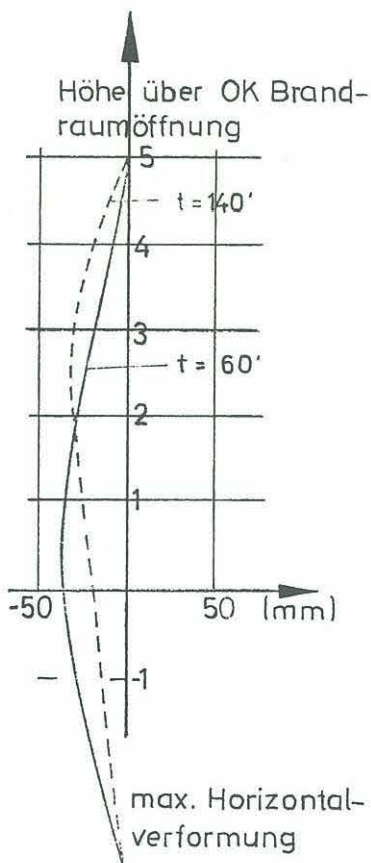
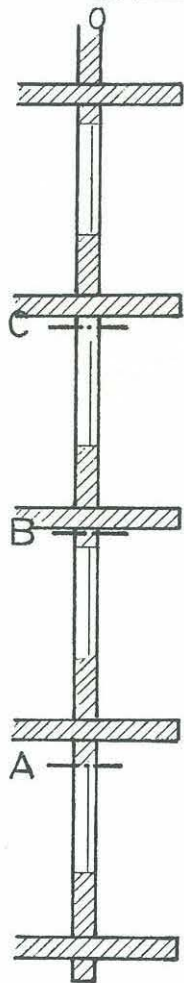


Maximale Oberflächentemperaturen der Stahlbetonaußenstütze
an der dem Brandraum abgekehrten Seite c

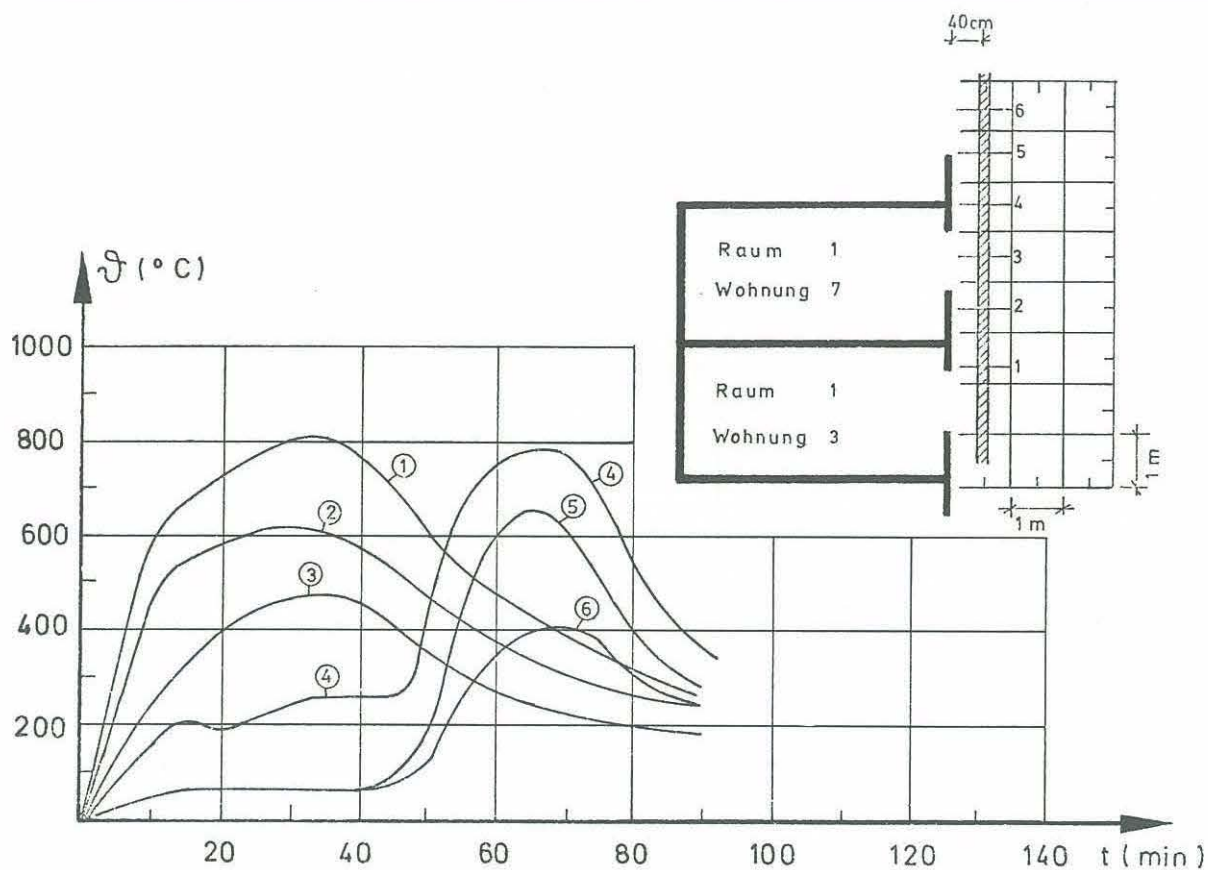




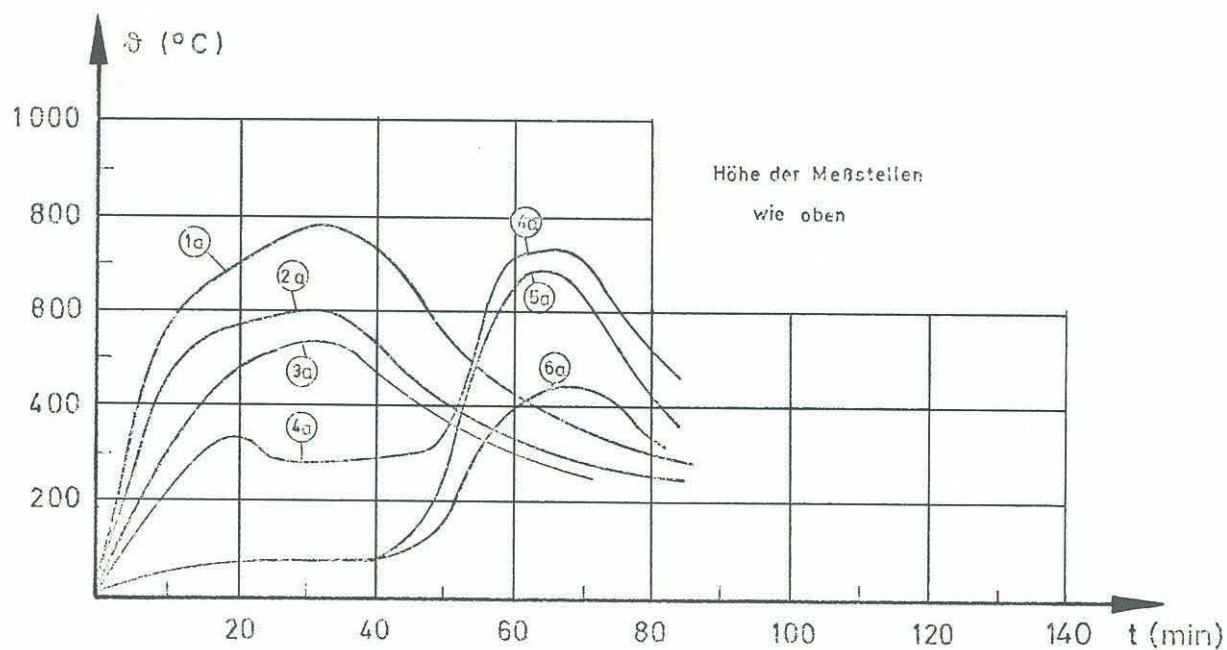
Zeit – Verformungslinien in Höhe der Punkte A, B und C



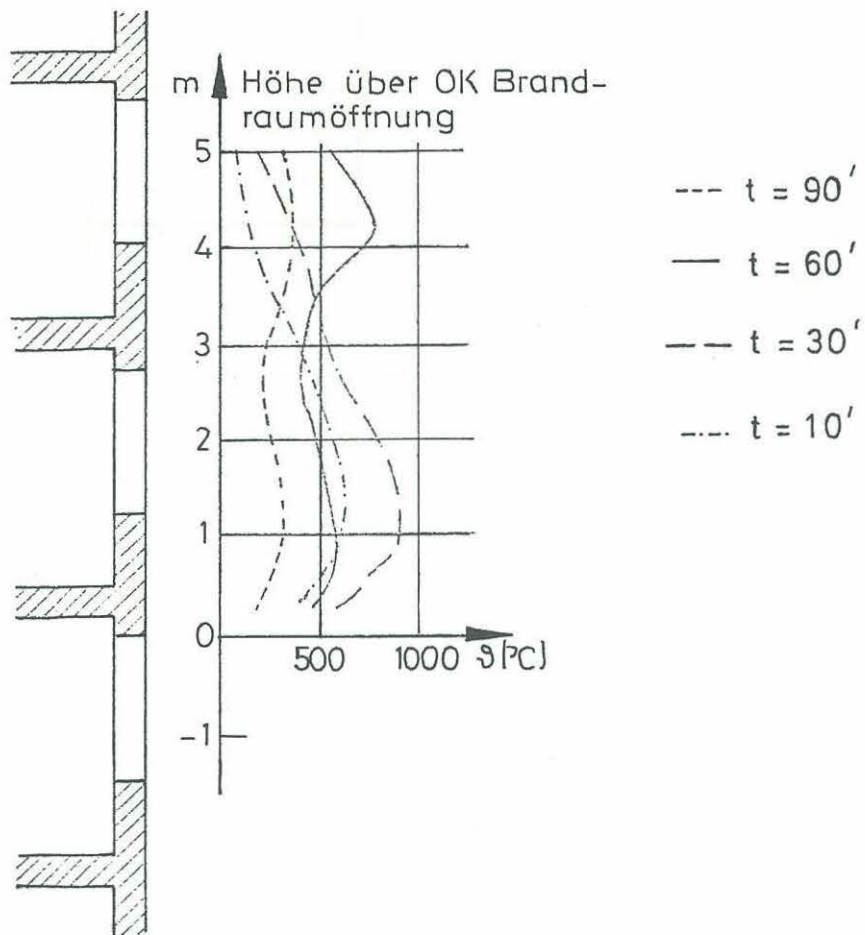
Maximale Verformungen der Stahlbetonaußenstütze



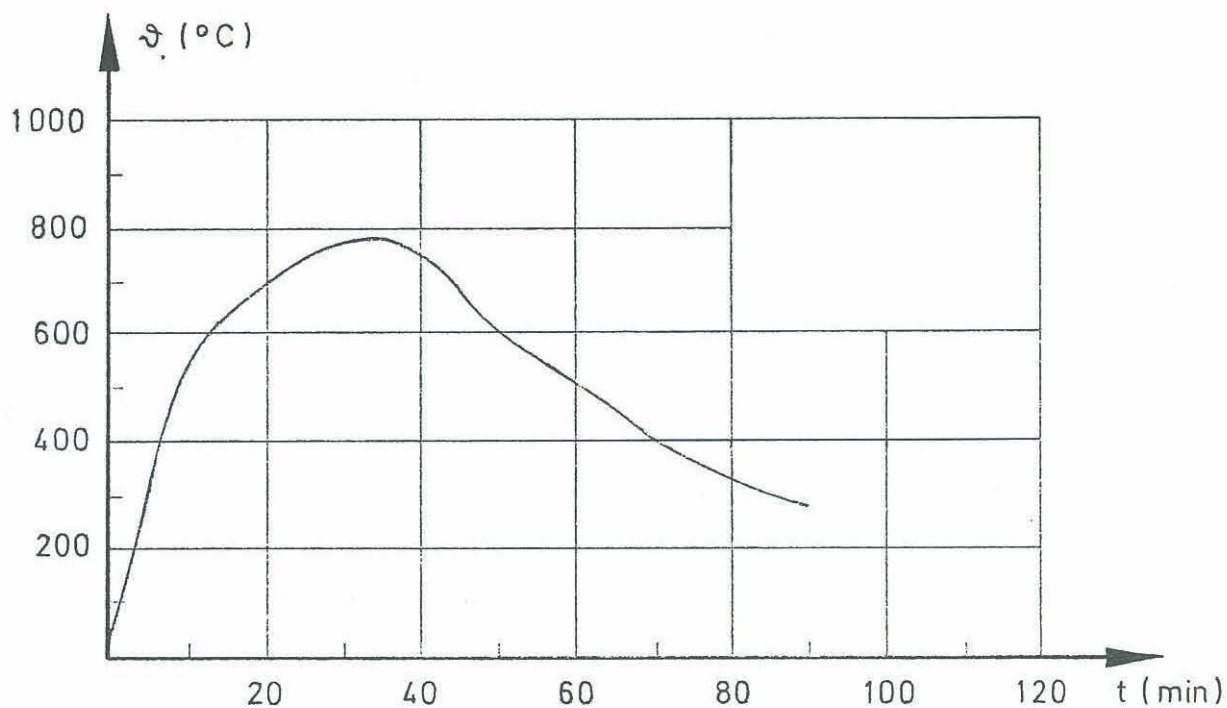
Temperaturverlauf an der Außenstütze IPB 240
(dem Brandraum zugekehrten Flansch)



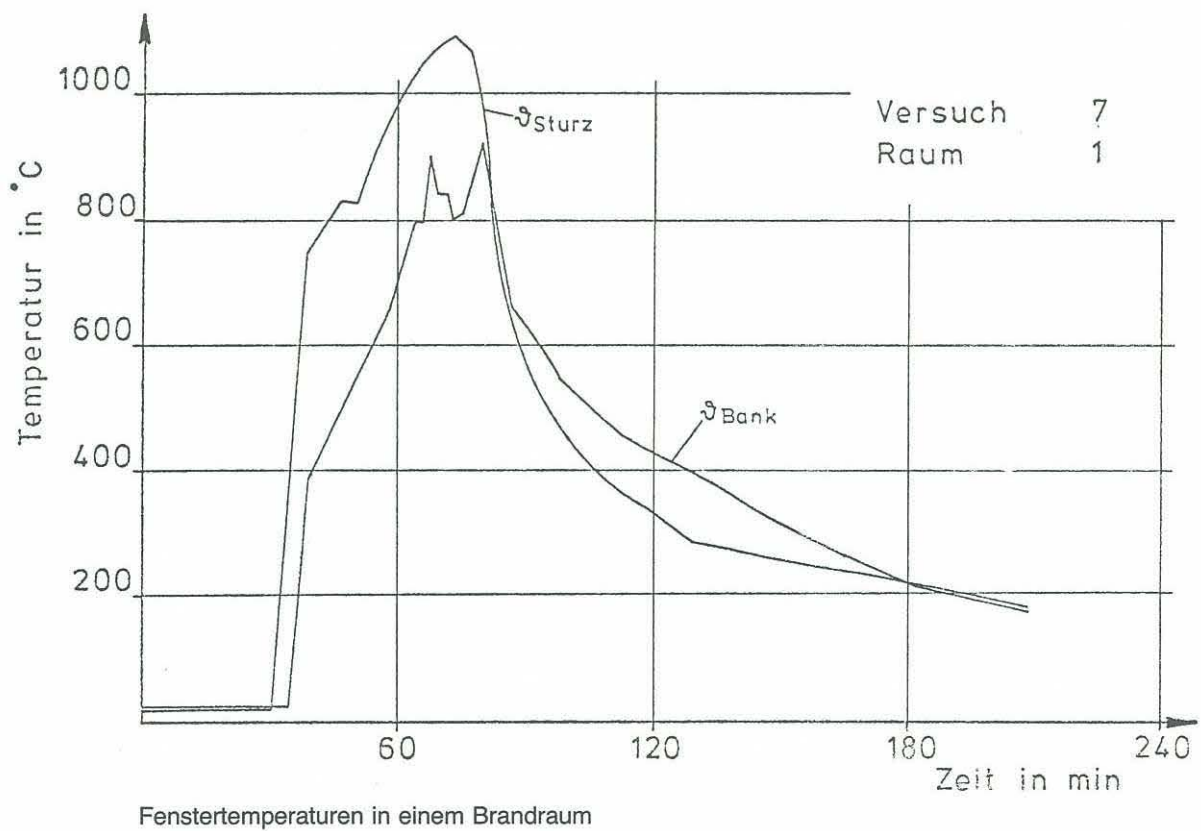
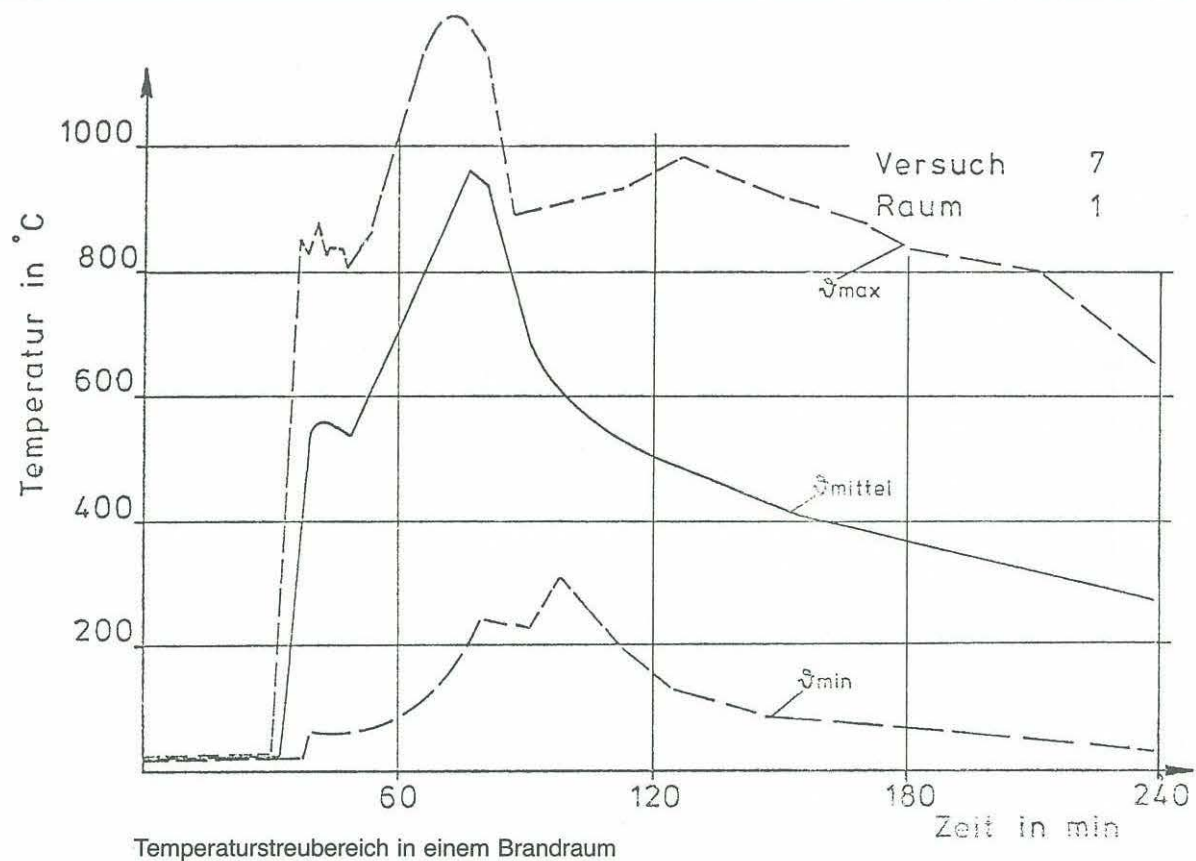
Temperaturverlauf an der Außenstütze IPB 240
(dem Brandraum abgewandten Flansch)



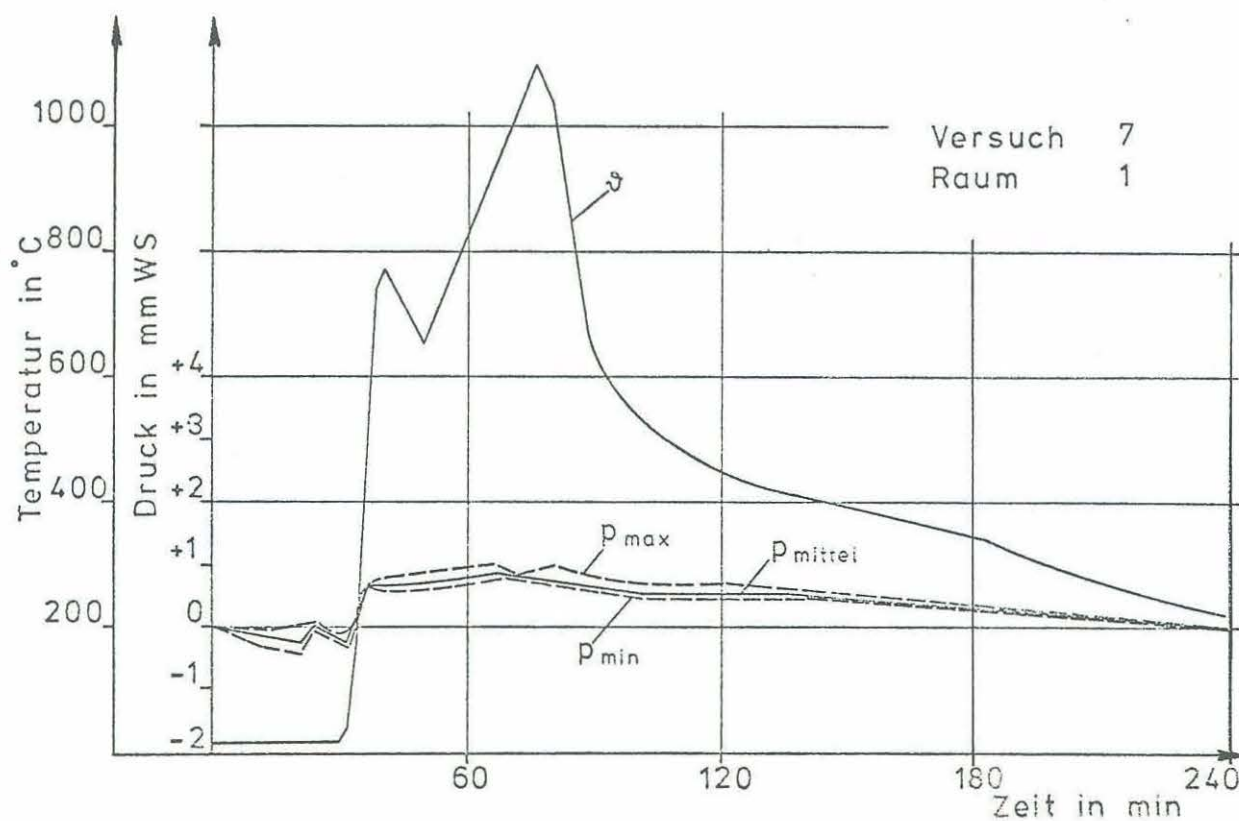
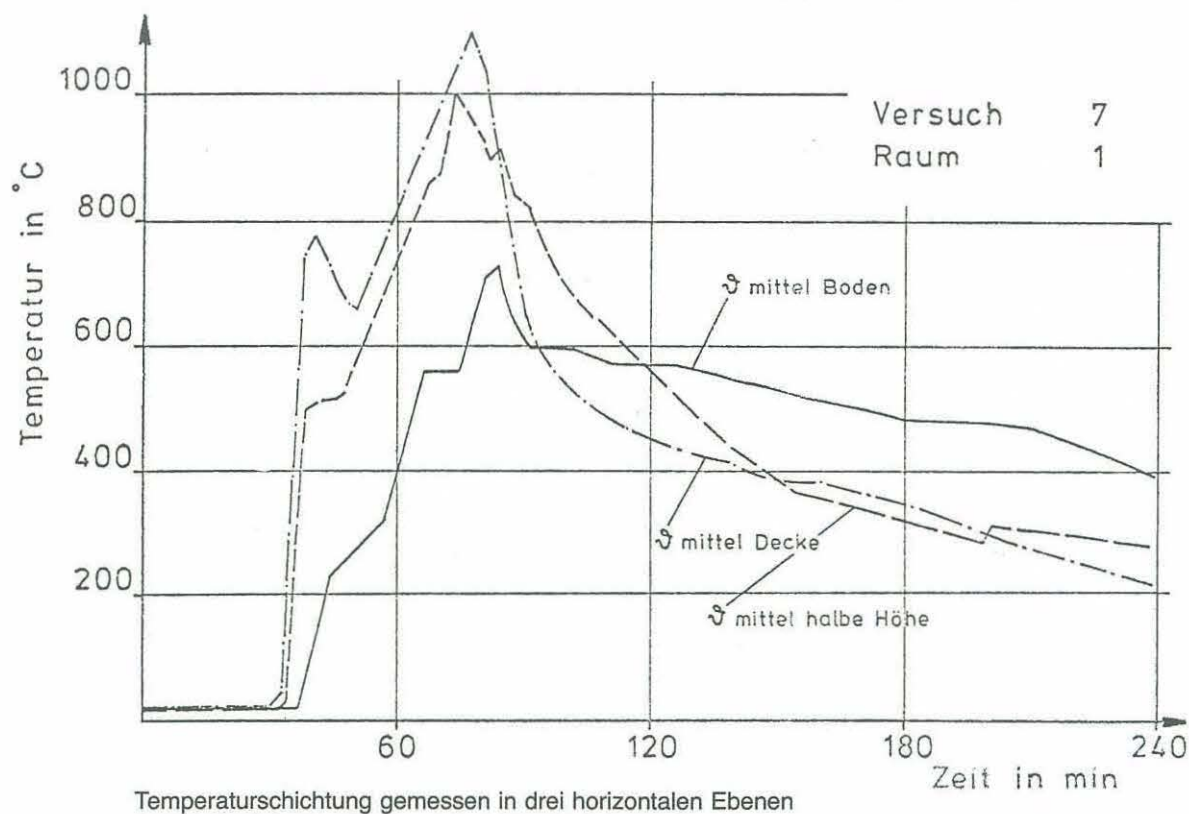
Maximaltemperaturen an der Außenstütze IPB 240



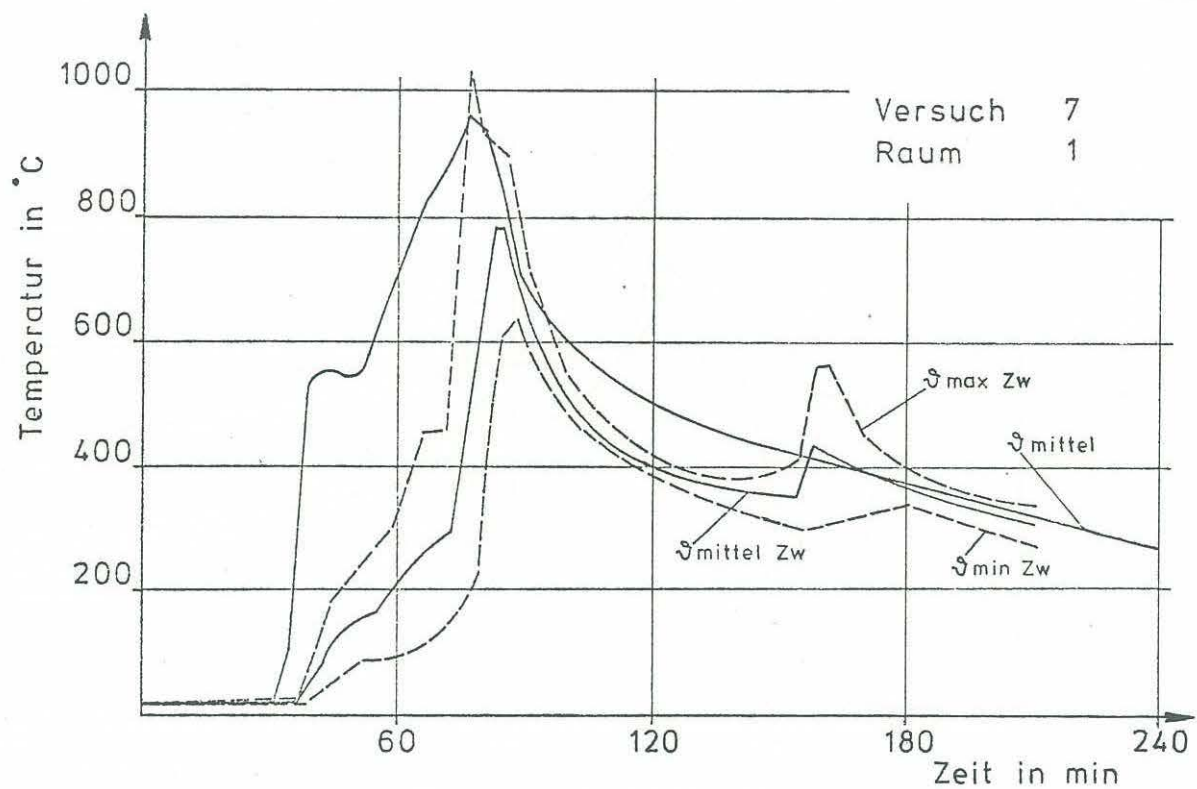
Temperaturverlauf am Vergleichskörper IPB 240
($l = 1 \text{ m}$) in Brandraummitte; Raum 1, Wohnung 3



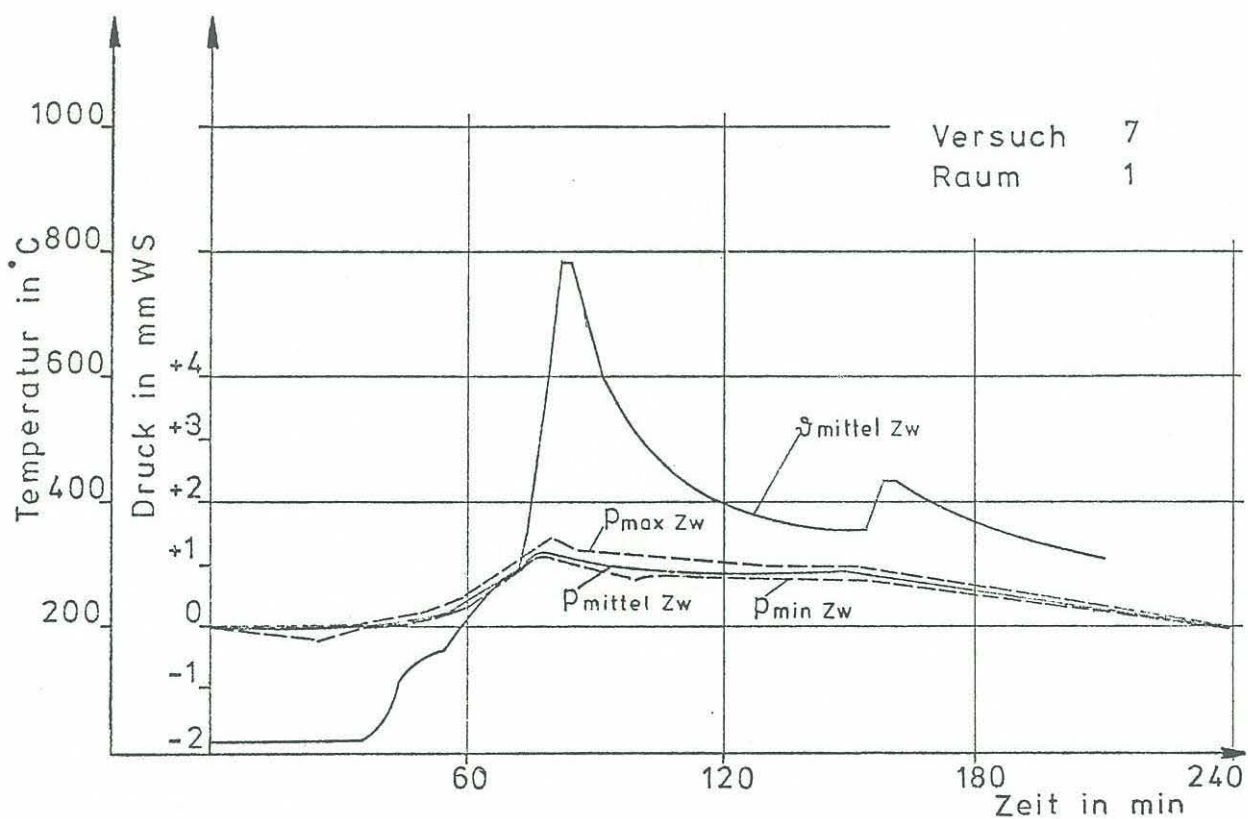
Anlage zum Versuch 7
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2



Anlage zum Versuch 7
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4

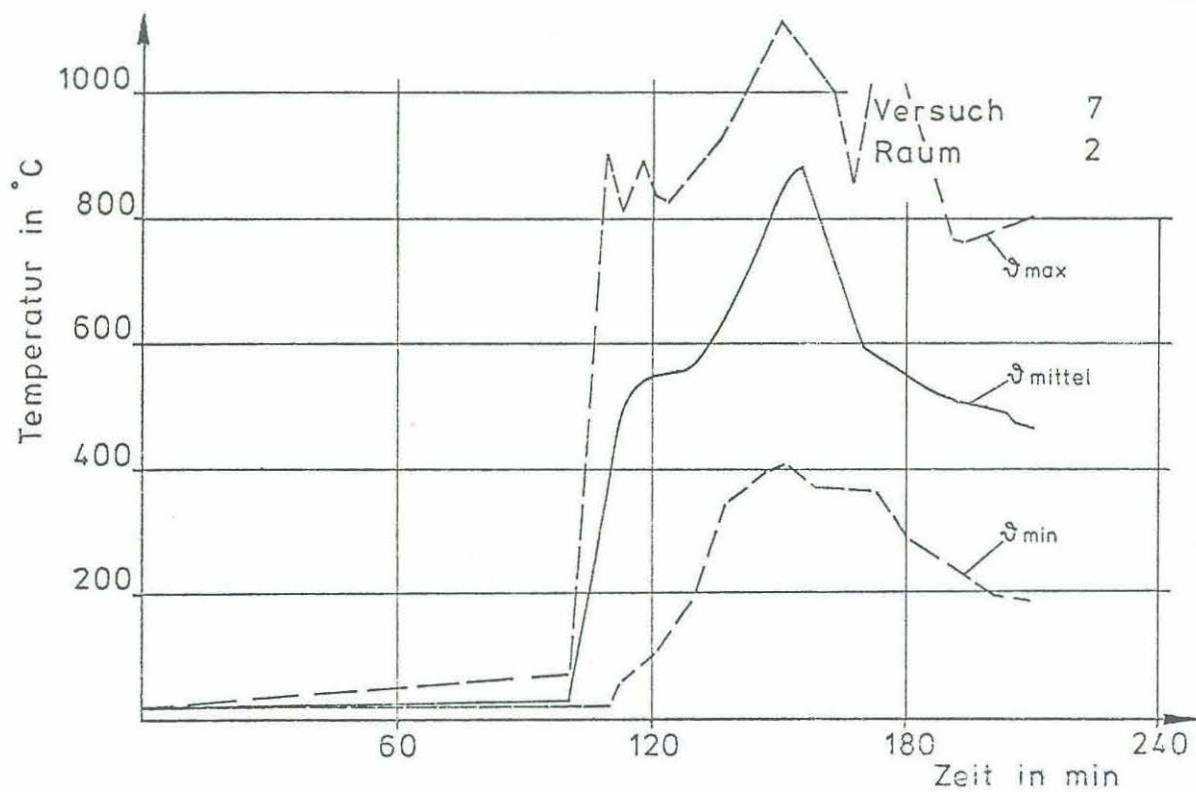


Temperaturstreibereich über einer Zwischendecke und mittlere Brandraumtemperatur

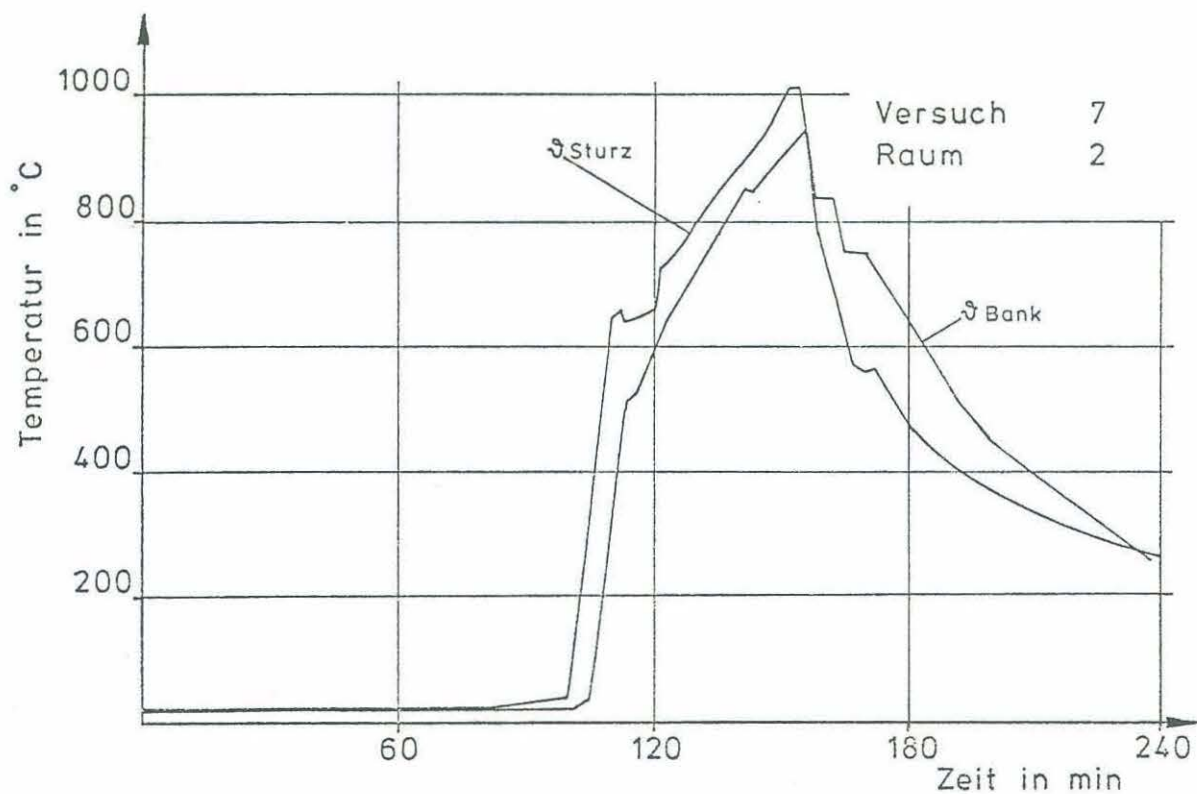


Druckstreibereich über einer Zwischendecke und mittlere Zwischendeckentemperatur

Anlage zum Versuch 7
Kap. 6.1 Nr. 5
Kap. 6.1 Nr. 6

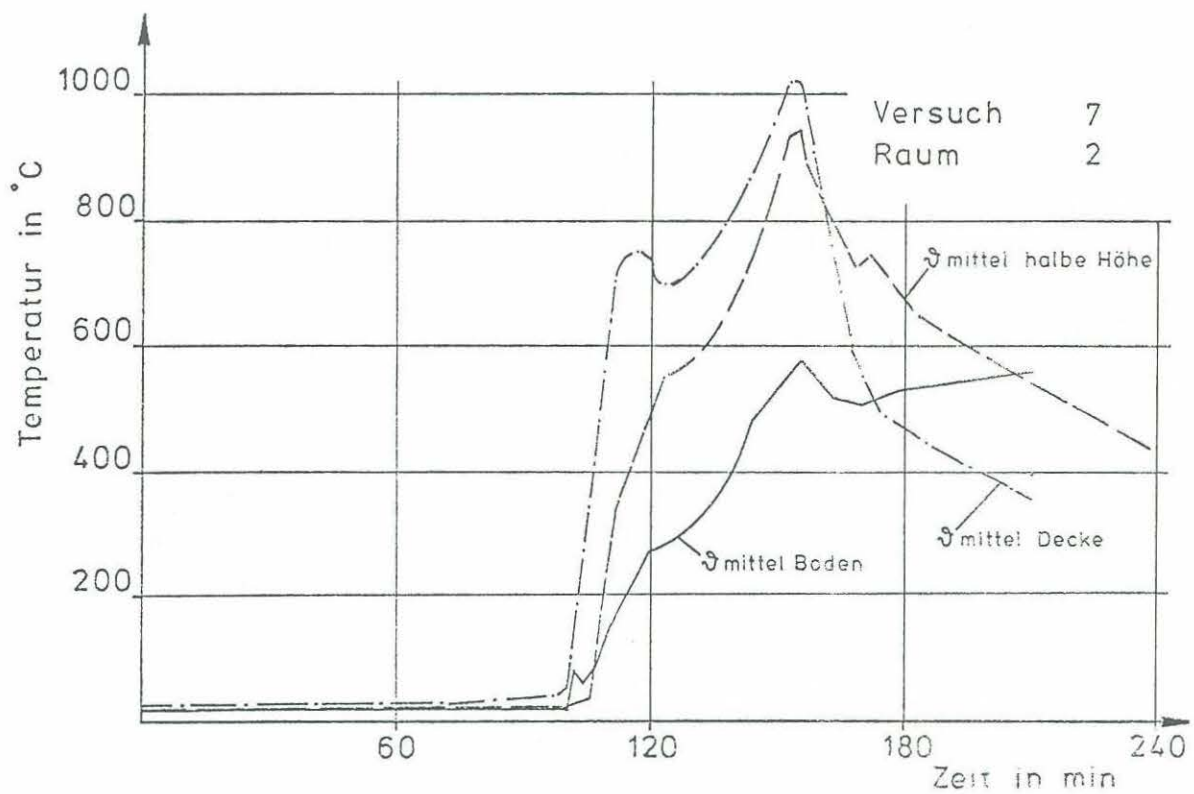


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

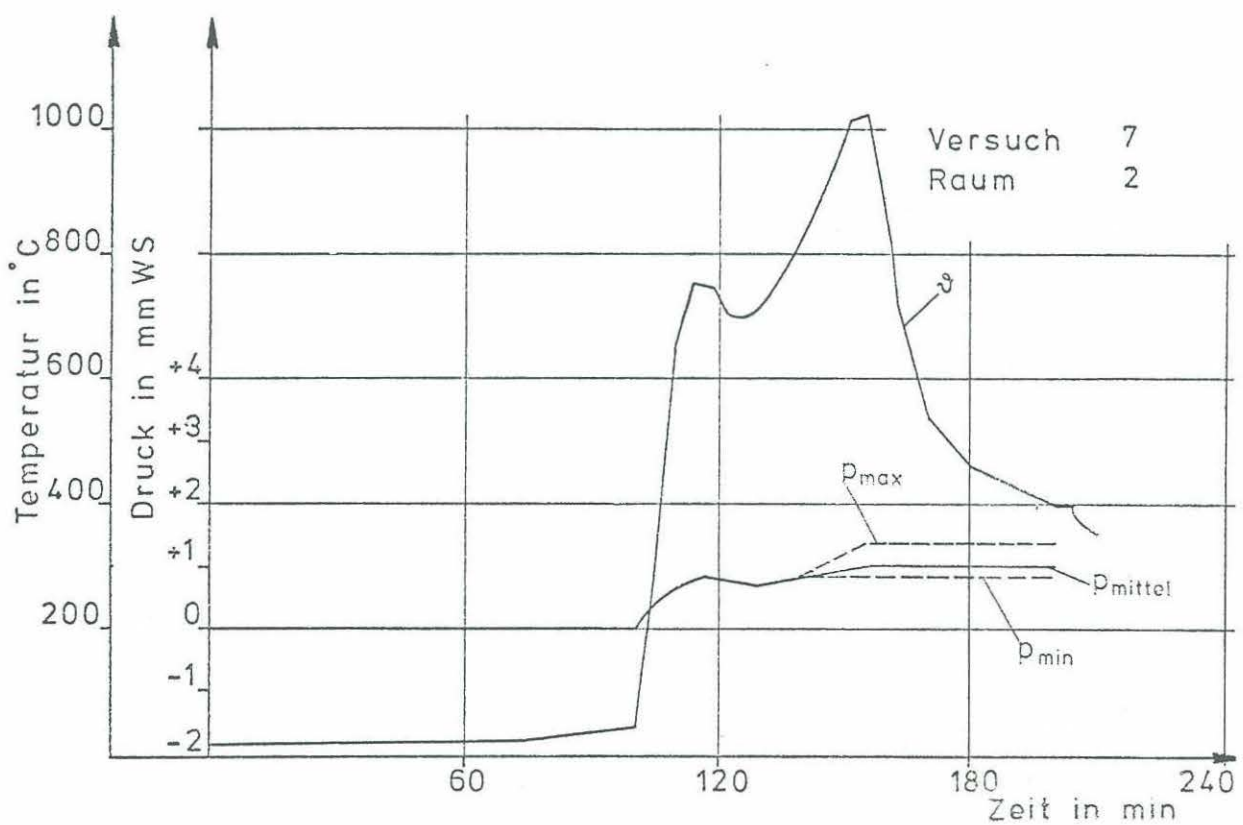


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 7
Kap. 6.1 Nr. 7
Kap. 6.1 Nr. 8

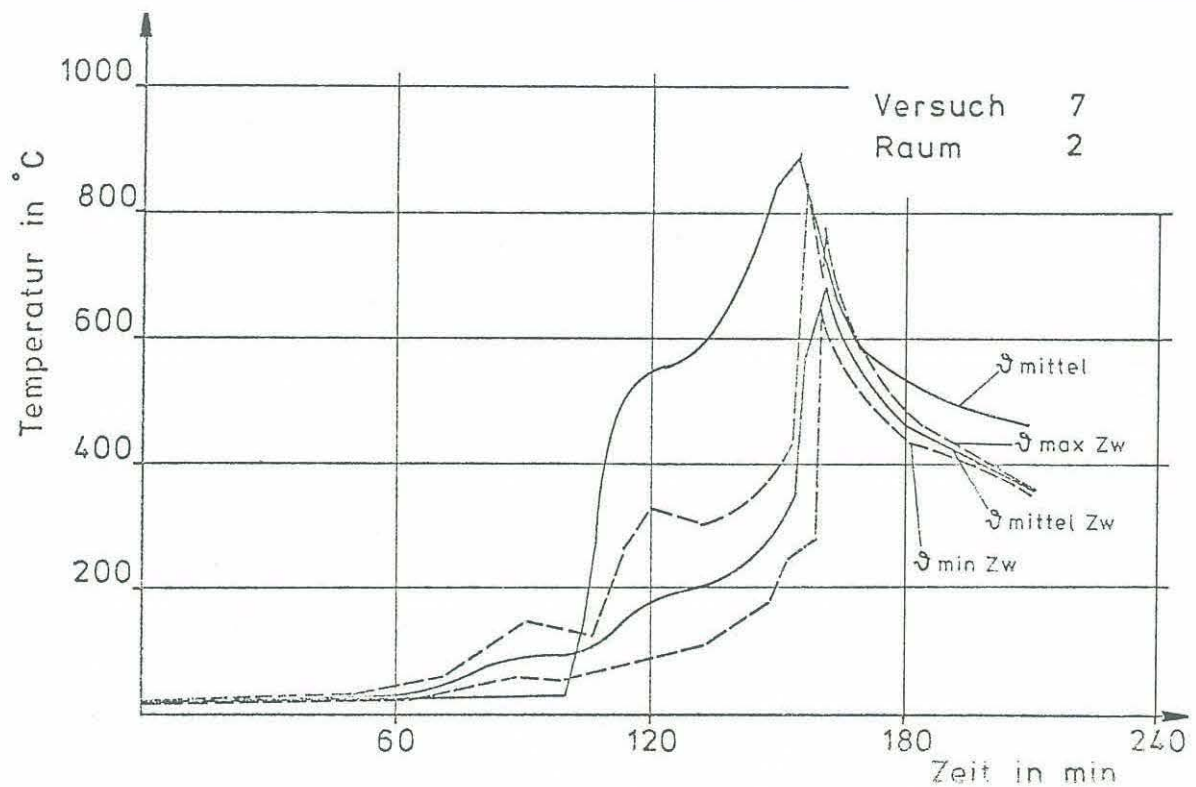


Temperaturschichtung gemessen in drei horizontalen Ebenen

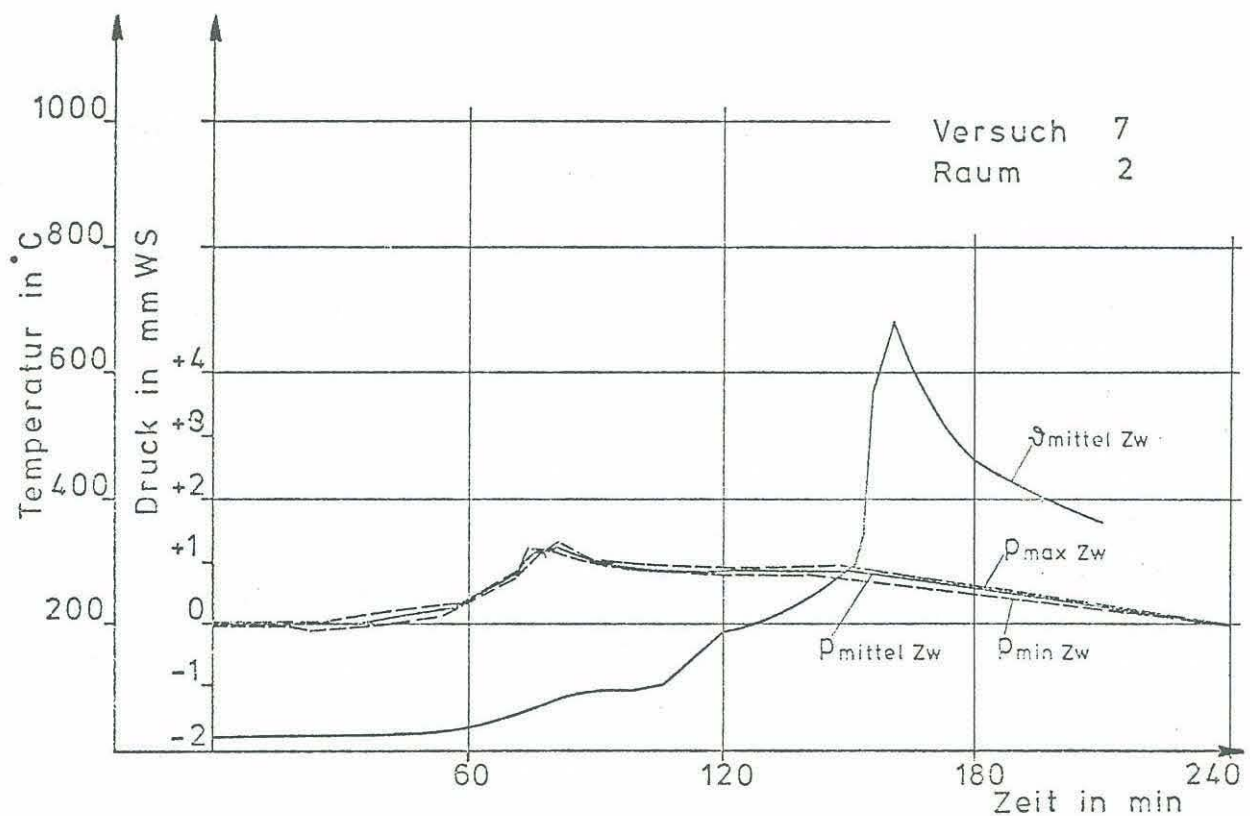


Druckstreubereich unter der Decke und mittlere Deckentemperatur

Anlage zum Versuch 7
 Kap. 6.1 Nr. 9
 Kap. 6.1 Nr. 10

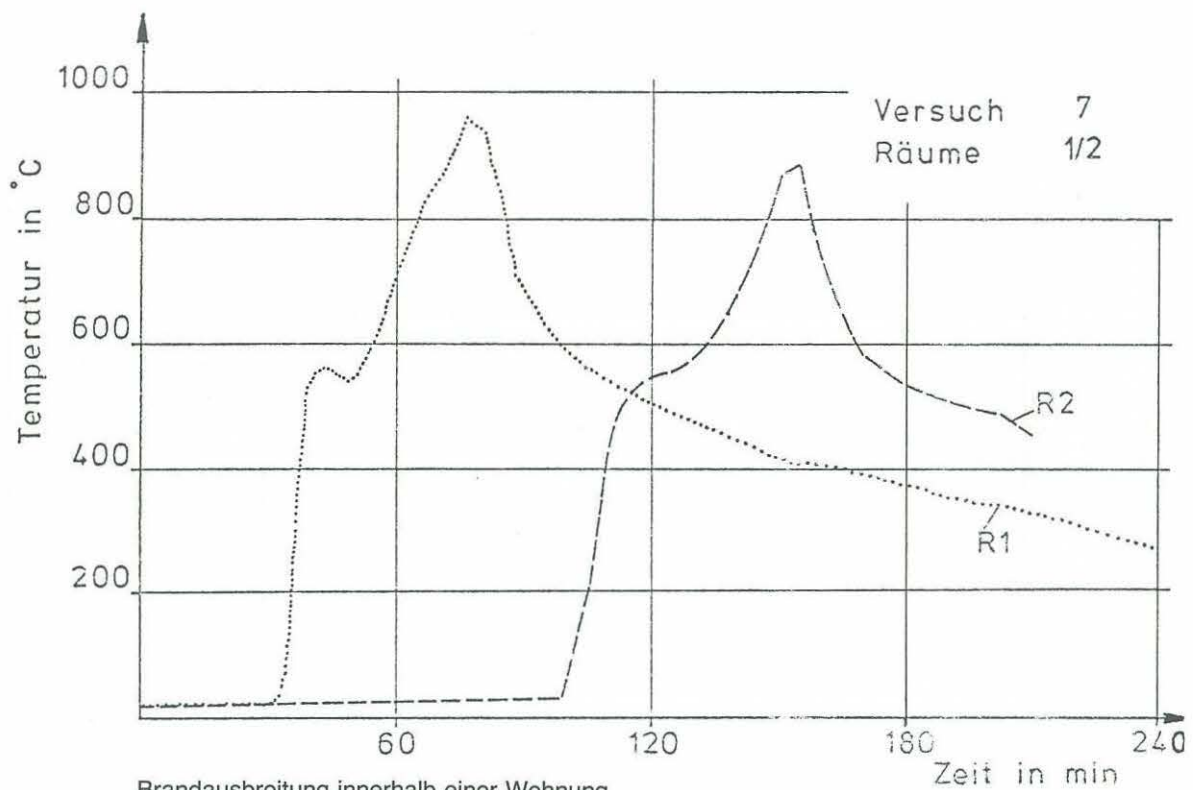


Temperaturstreibereich über einer Zwischendecke und mittlere Brandraumtemperatur

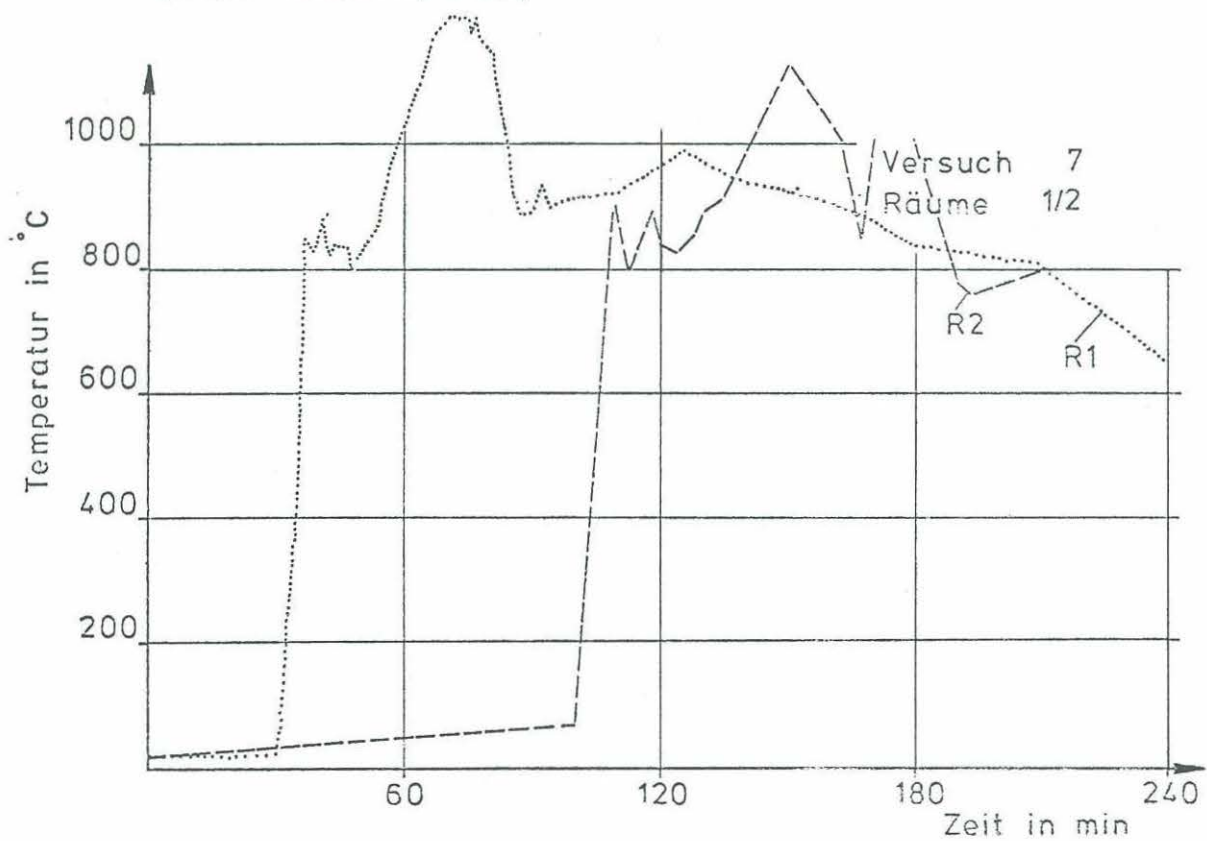


Druckstreibereich über einer Zwischendecke und mittlere Zwischendeckentemperatur

Anlage zum Versuch 7
Kap. 6.1 Nr. 11
Kap. 6.1 Nr. 12

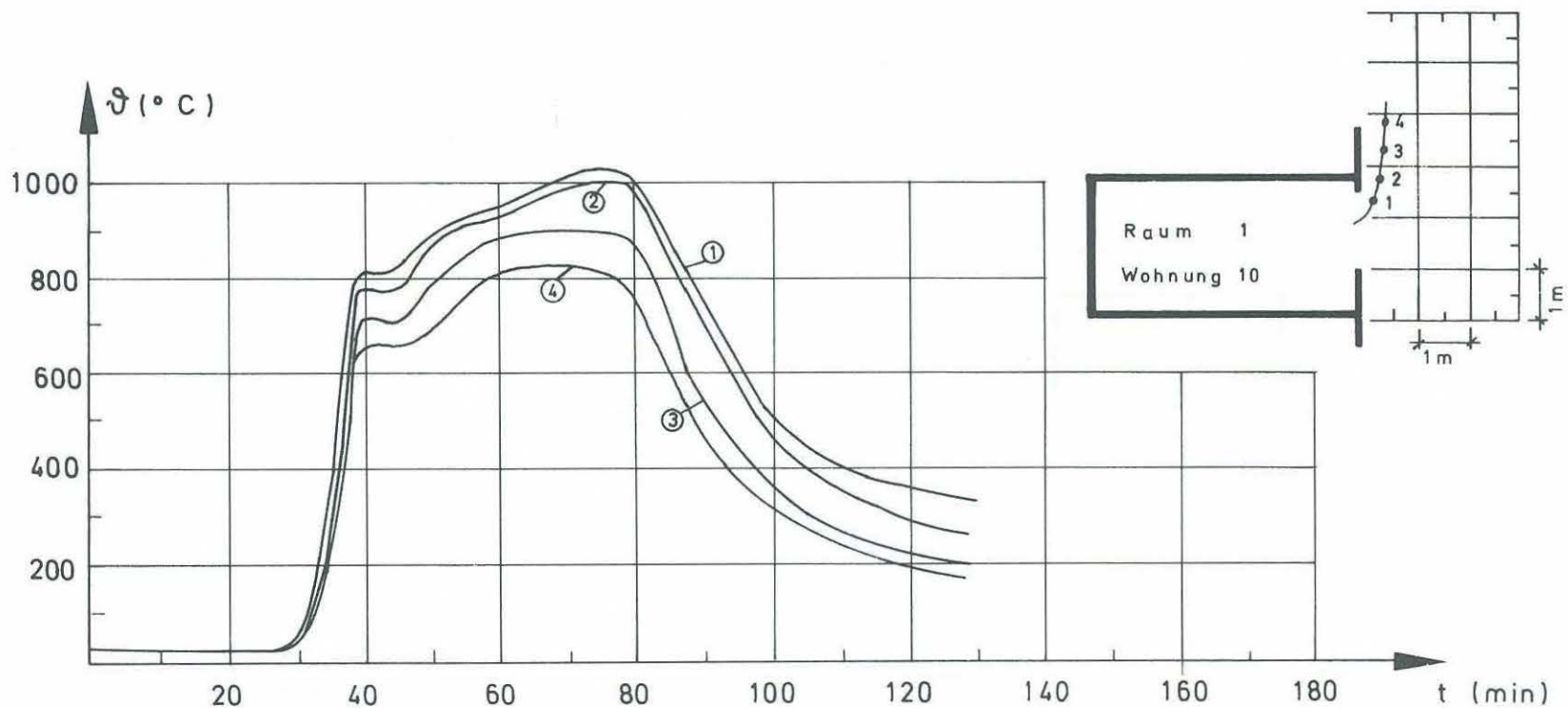


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung
(mittlere Brandraumtemperaturen)

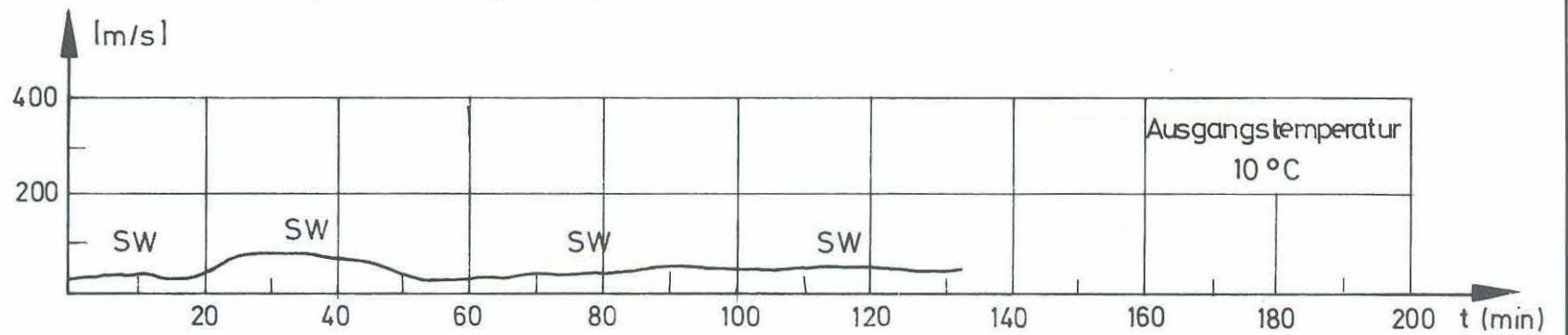


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung
(maximale Brandraumtemperaturen)

Anlage zum Versuch 7
Kap. 6.1 Nr. 13
Kap. 6.1 Nr. 14

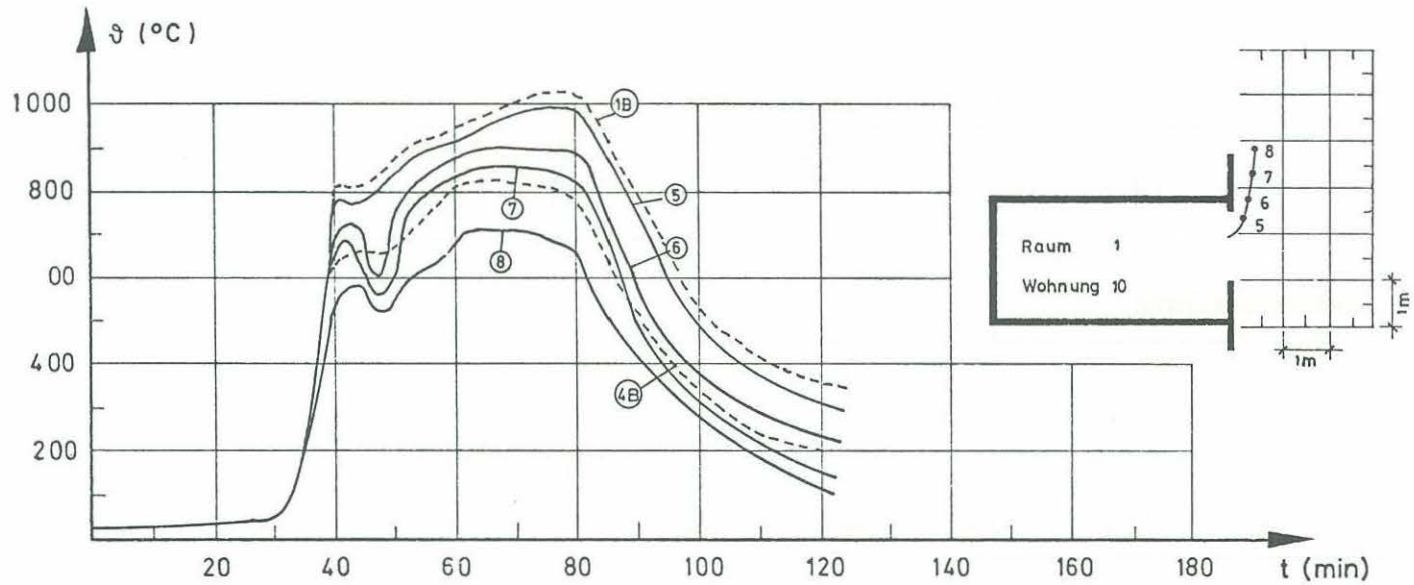


Maximaltemperaturen im Heißgasstrom (Ebene B)

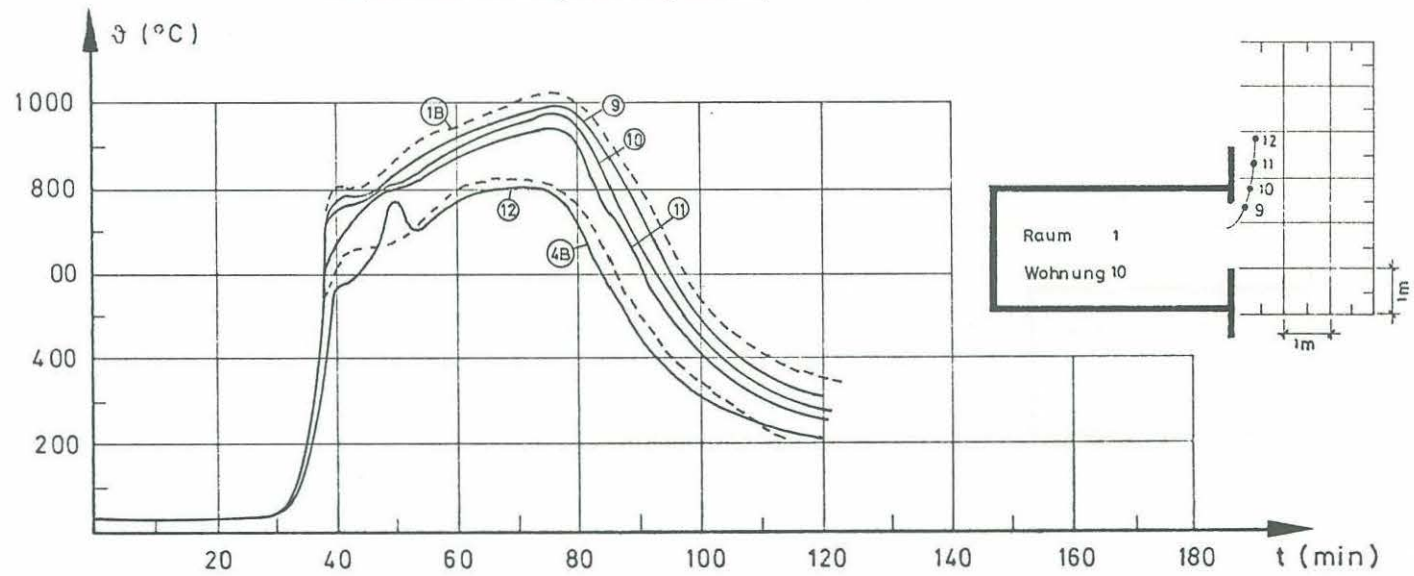


Windgeschwindigkeit und -richtung

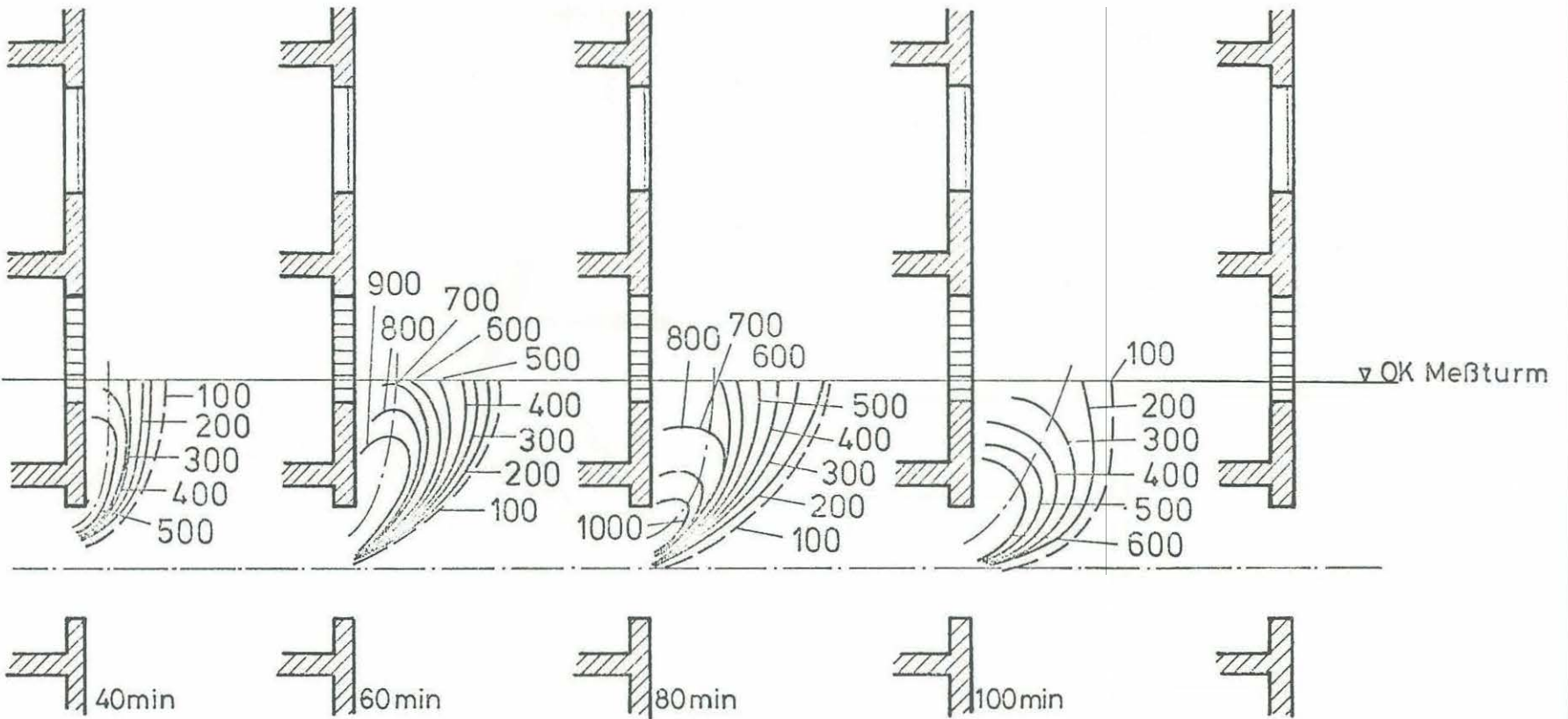
Anlage zum Versuch
Kap. 6.2
Nr. 1



Temperaturen im Heißgasstrom (Ebene A)

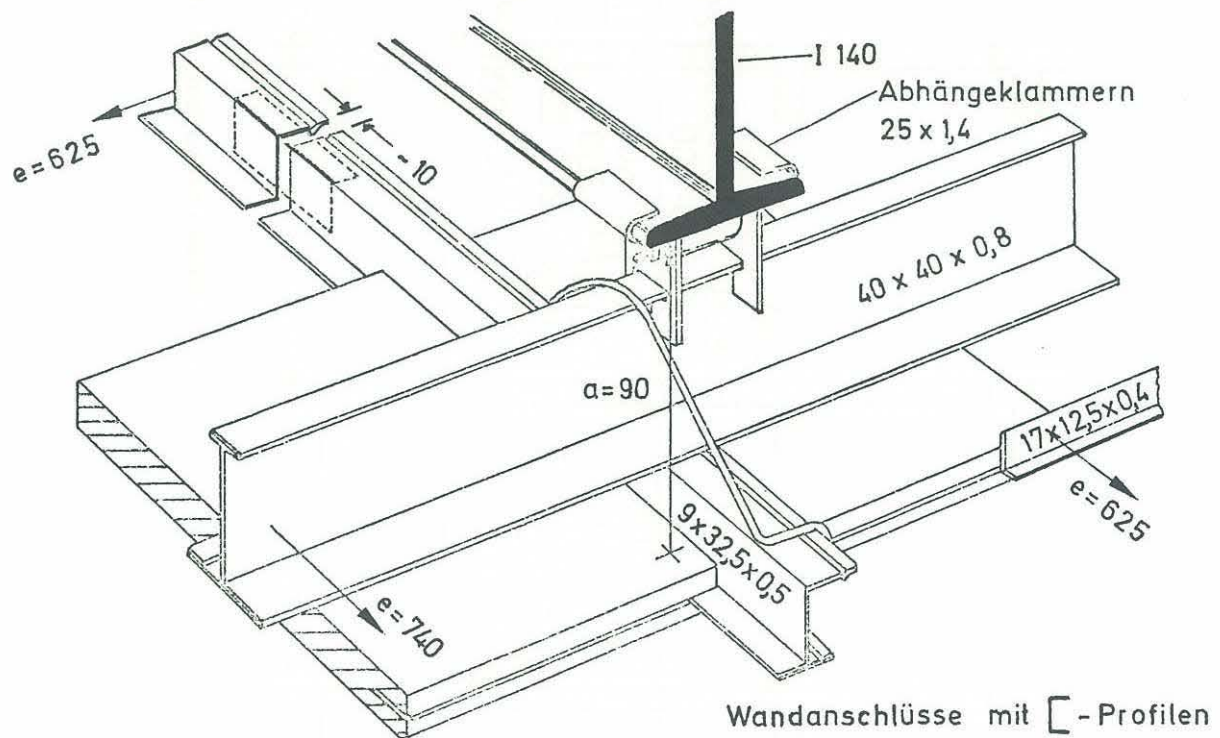
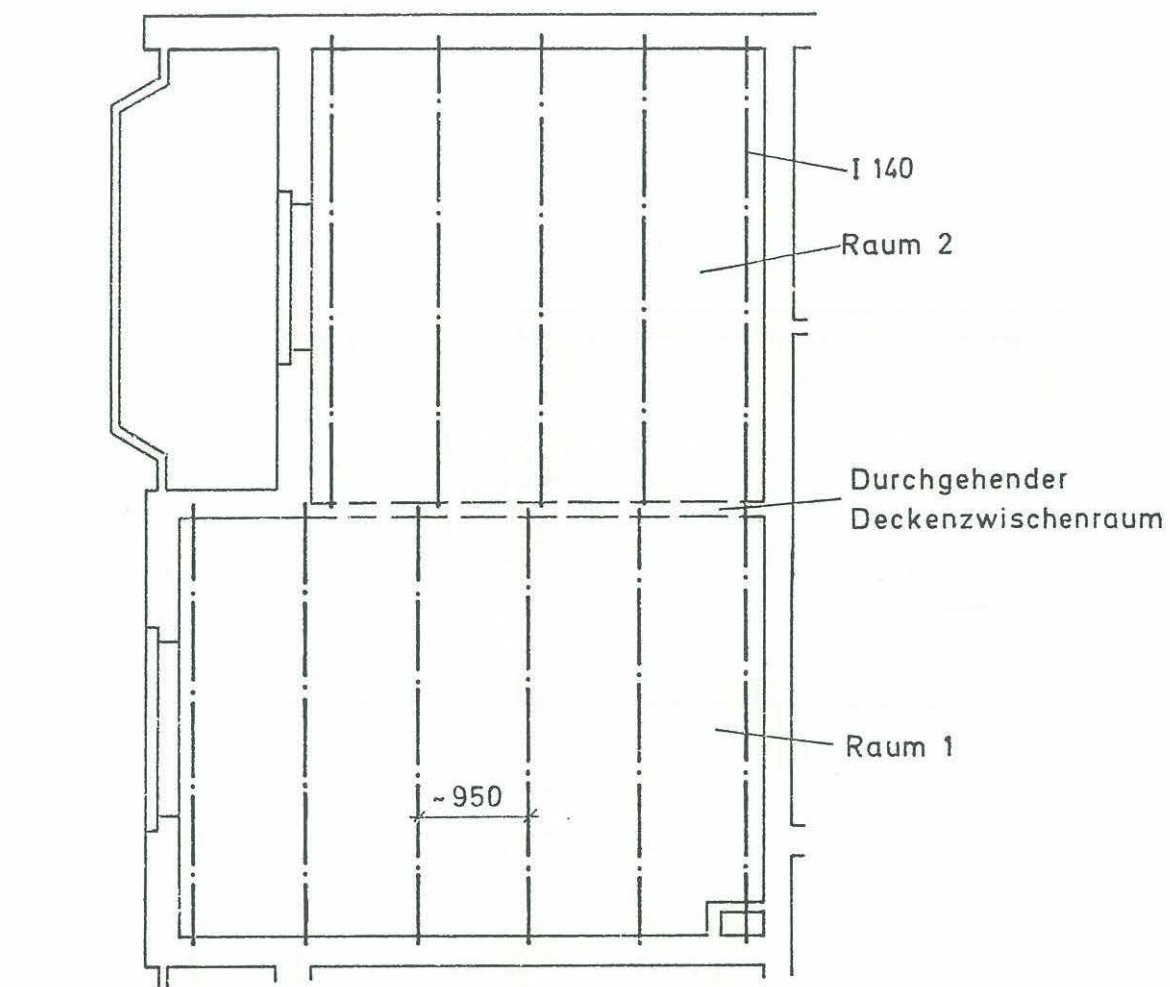


Temperaturen im Heißgasstrom (Ebene C)



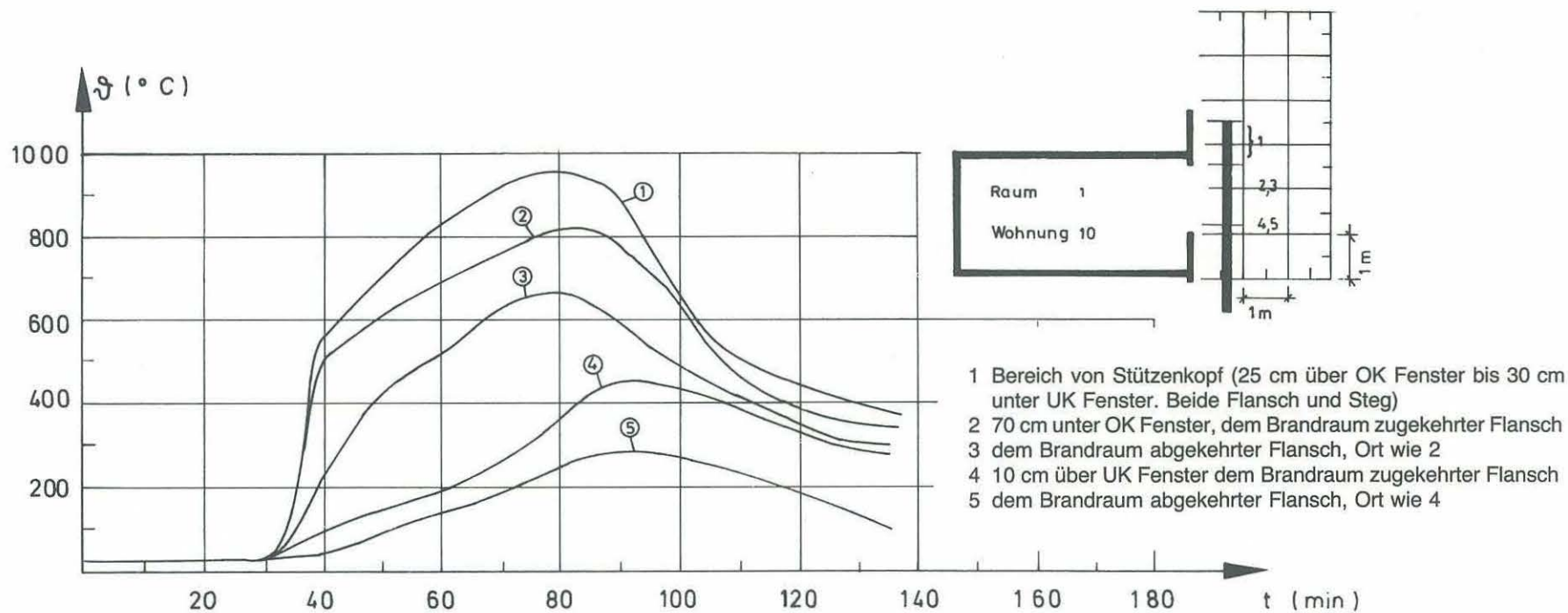
Isothermendarstellung des Temperaturfeldes (Ebene B)

Anlage zum Versuch
Nr. 3
7
Kap. 6.2

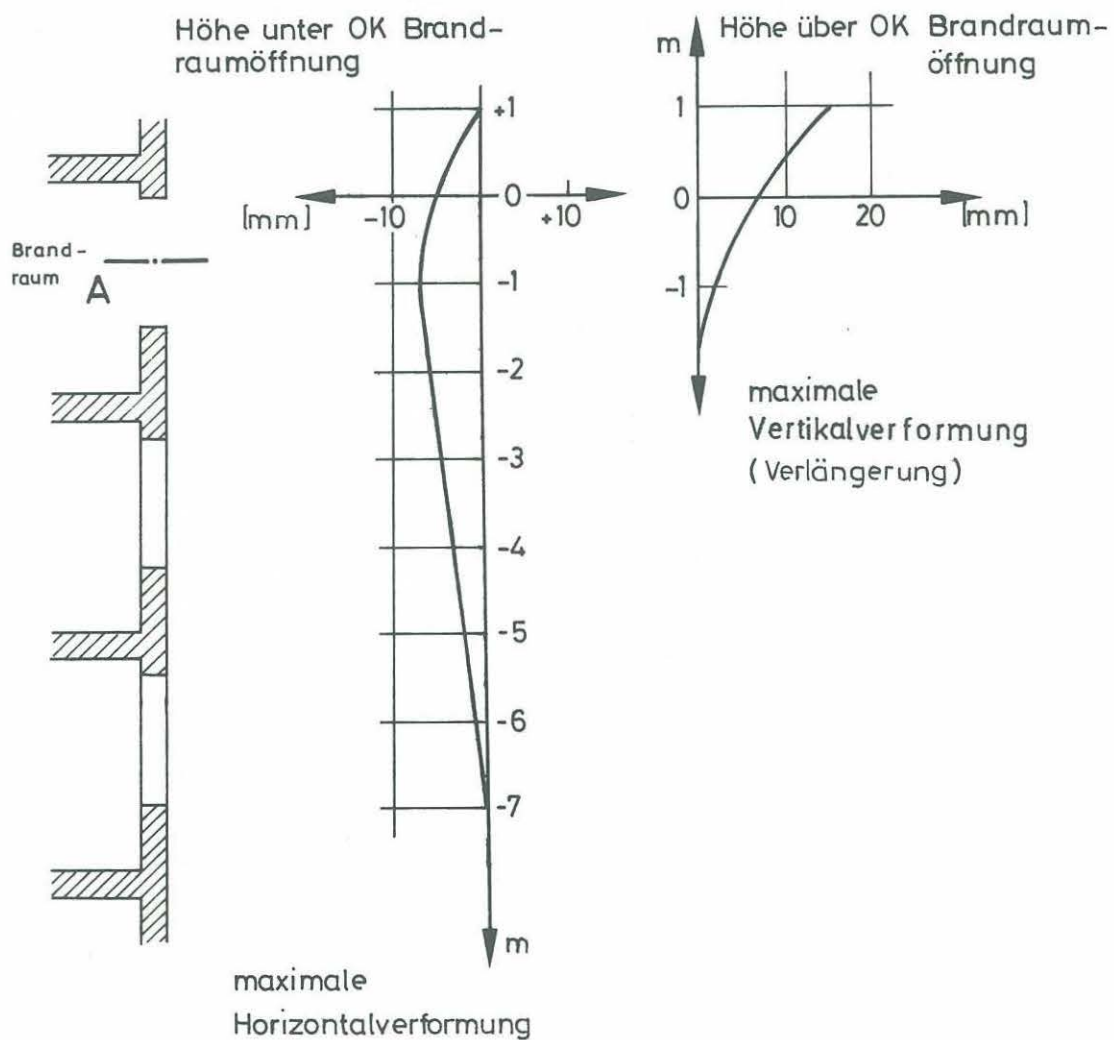
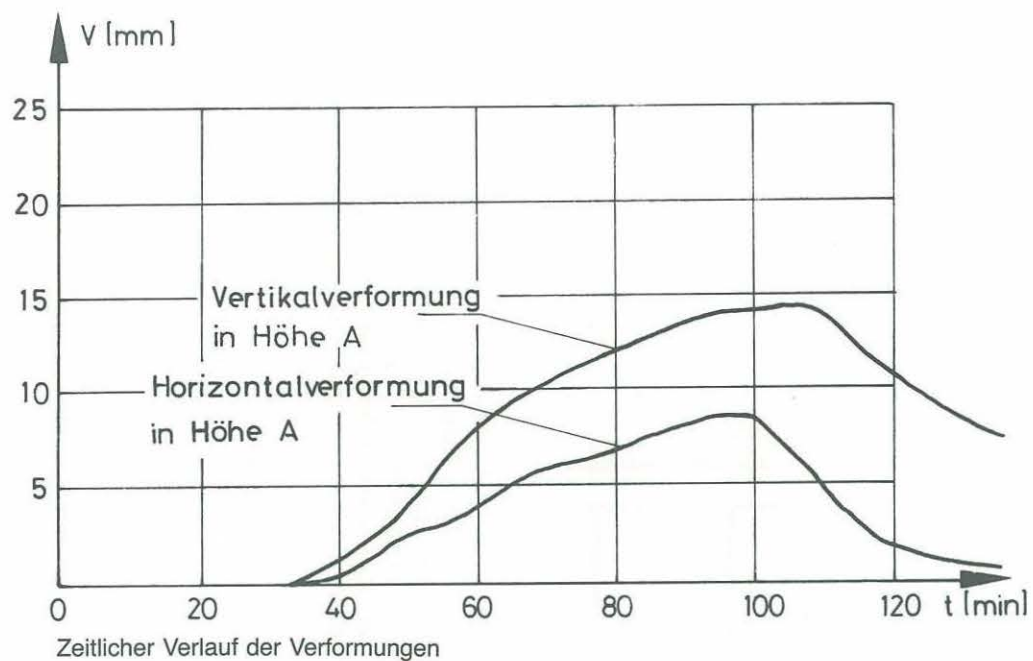


Unterdecke aus 15 mm dicken Mineralfaserplatten – verdecktes System – (Abhängetiefe $a = 90$ mm)

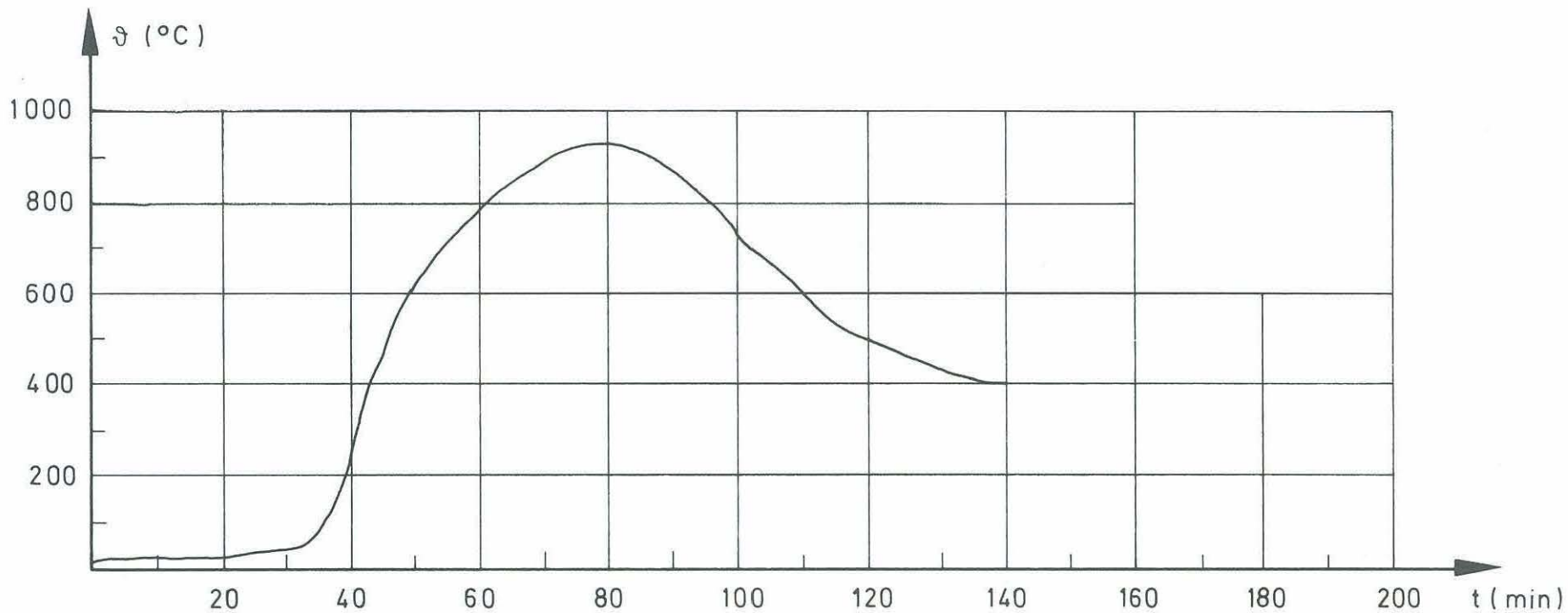
Anlage zum Versuch 7
Kap. 7.3 Nr. 1



Temperaturen an der Außenstütze IPB 240

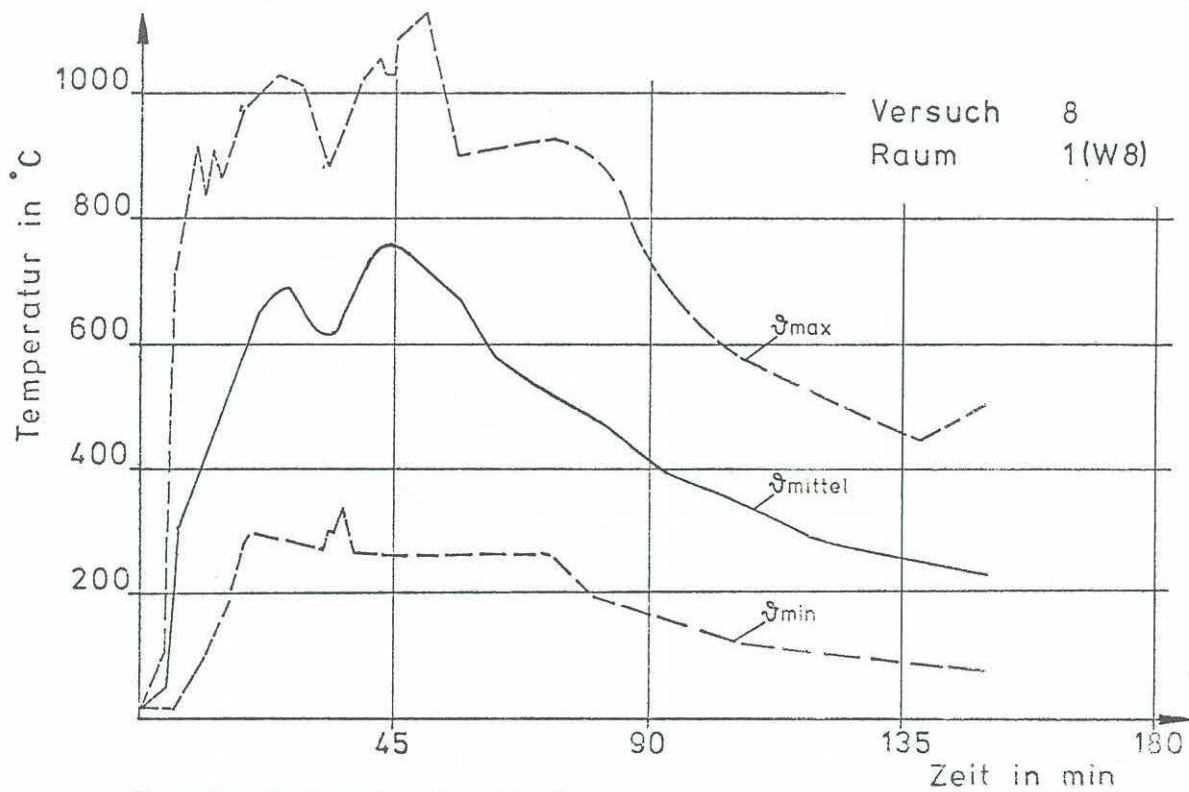


Verformungen der Außenstütze IPB 240

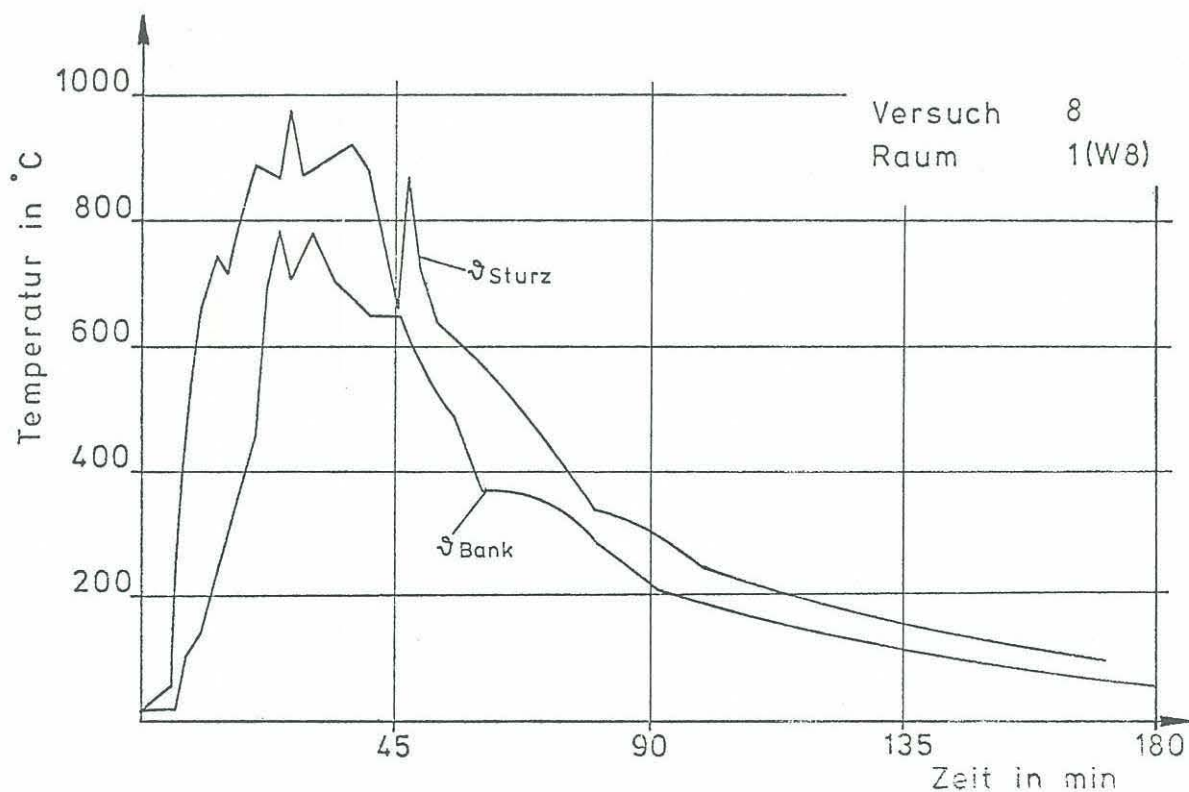


Temperaturverlauf am Vergleichskörper IPB 240 (l = 1 m) in Brandraummitte (Raum 1, Wohnung 10)

Anlage zum Versuch
Kap. 8.4
Nr. 3
7

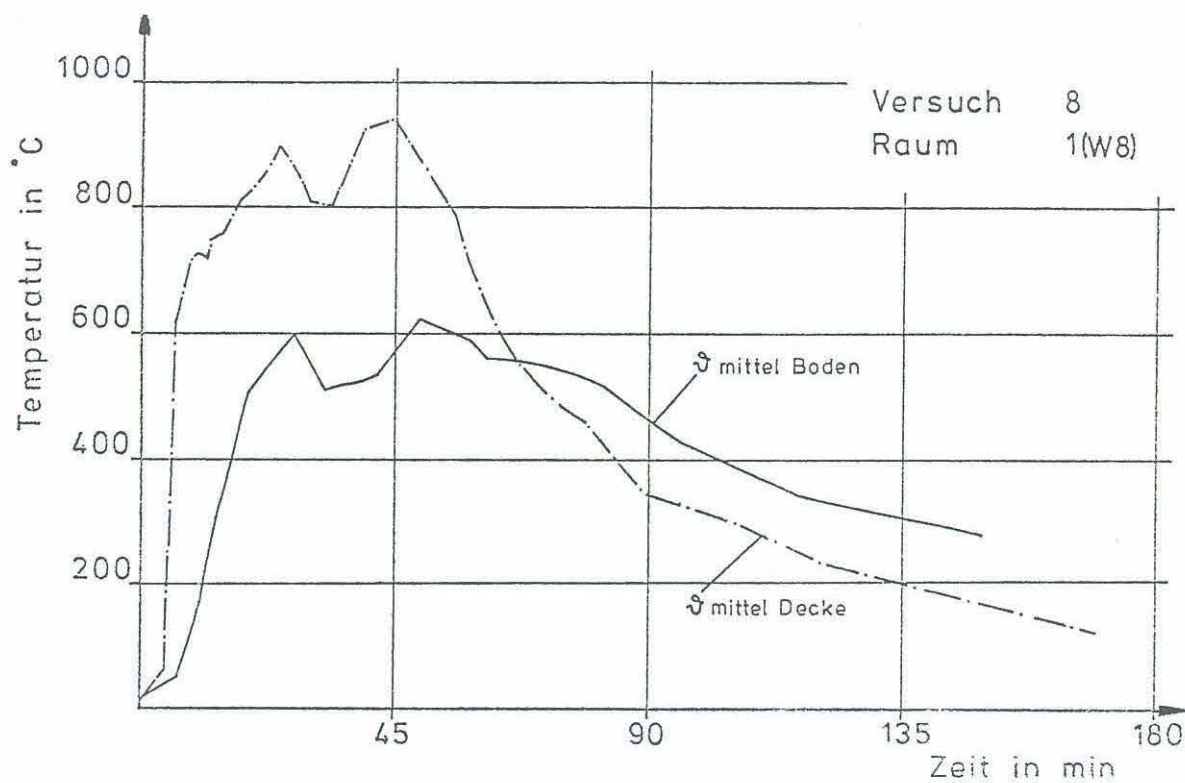


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

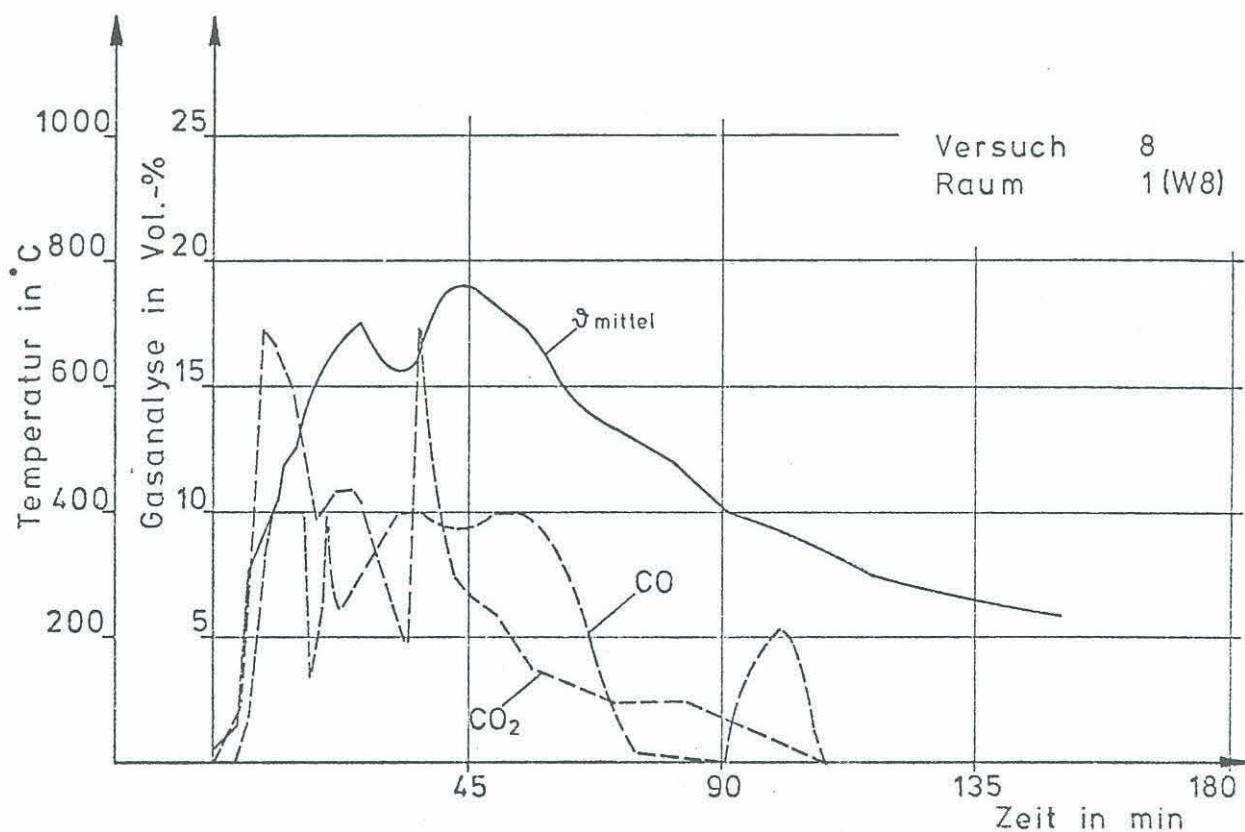


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 1
Kap. 6.1 Nr. 2

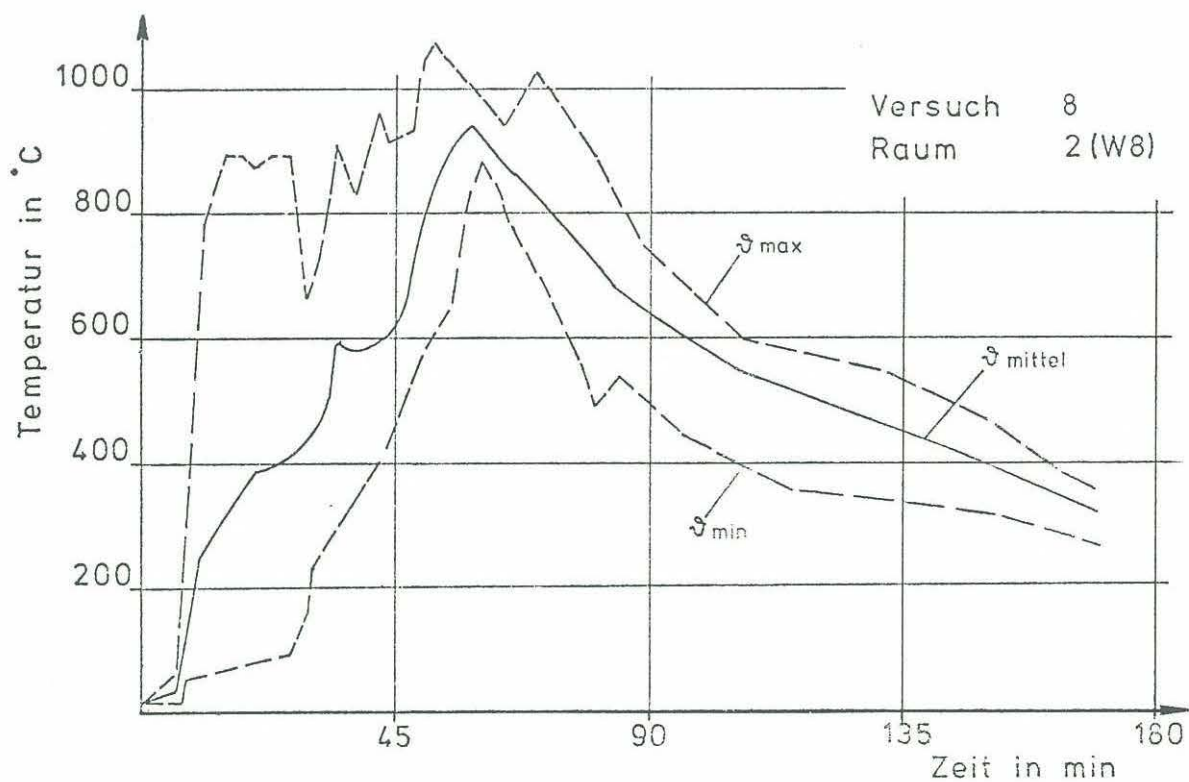


Temperaturschichtung gemessen in zwei horizontalen Ebenen

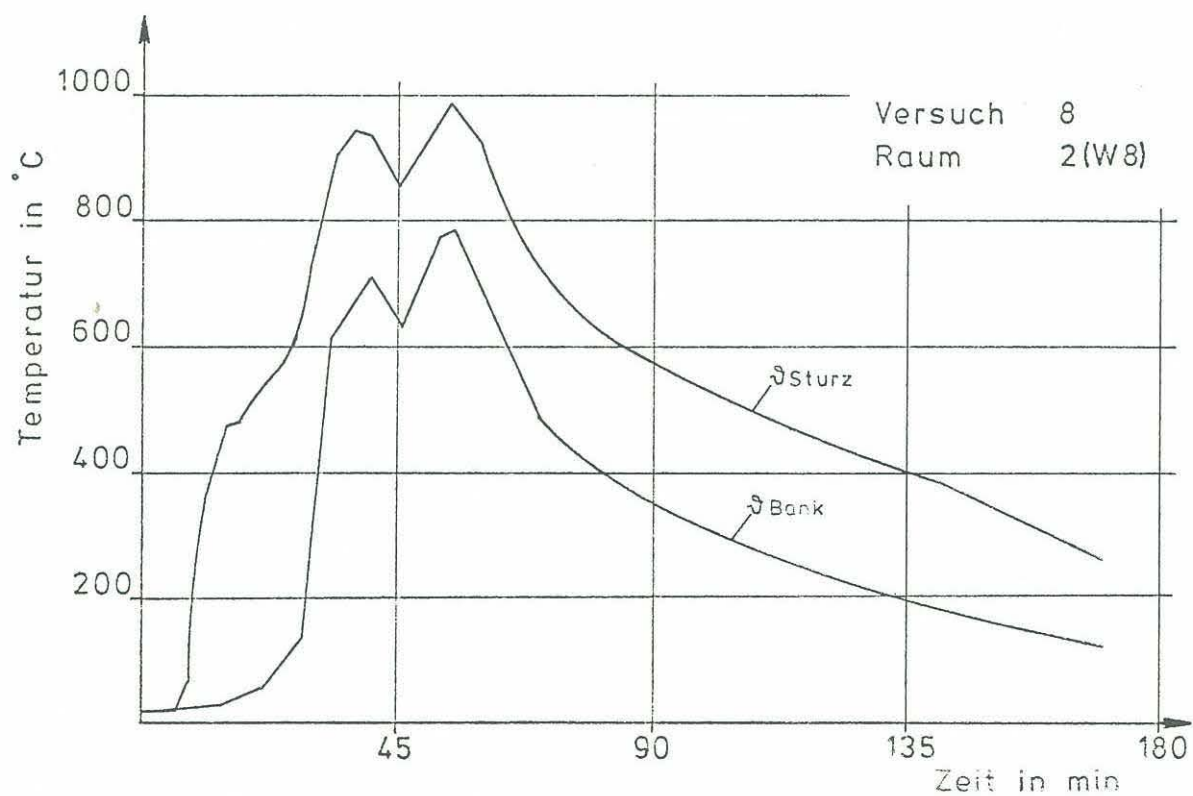


Mittlere Brandraumtemperatur und Gasanalyse

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 3
Kap. 6.1 Nr. 4

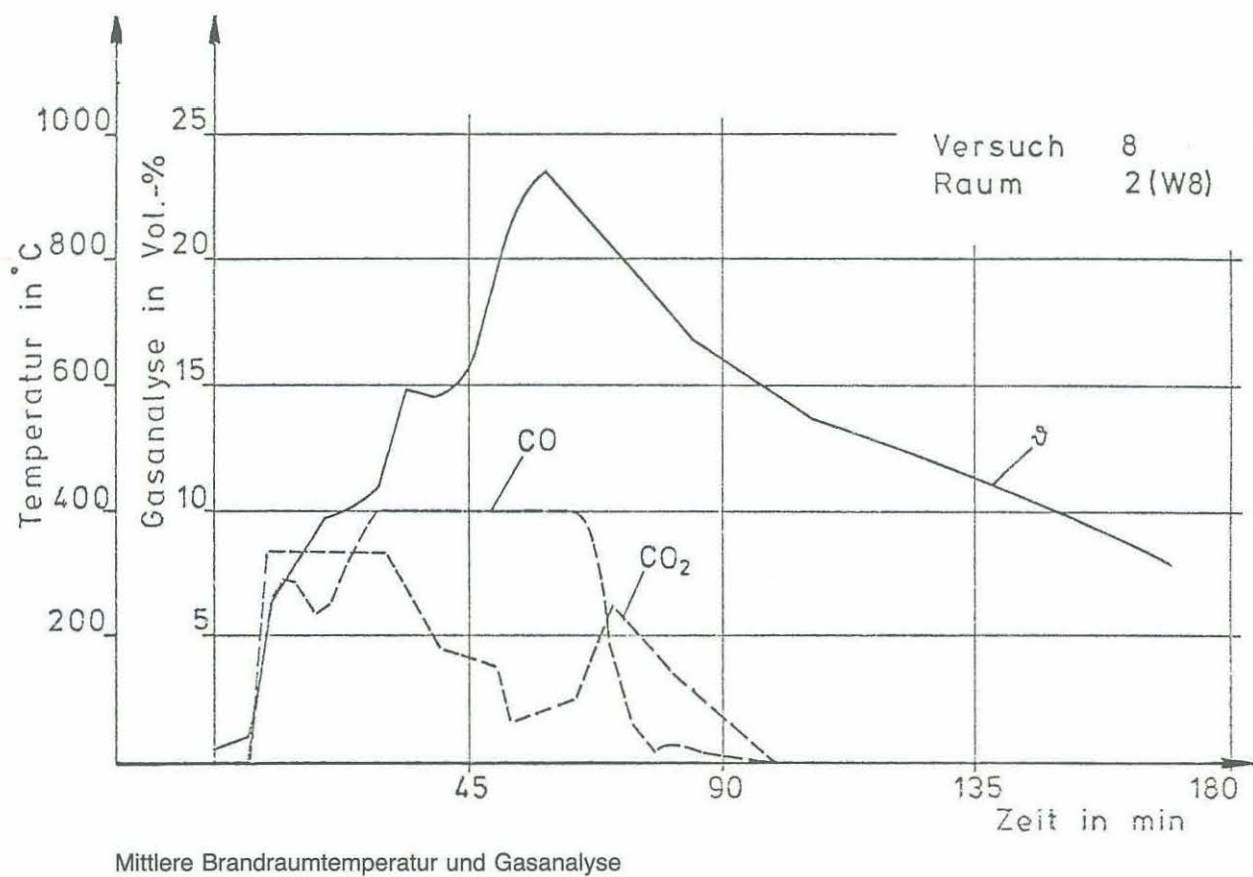
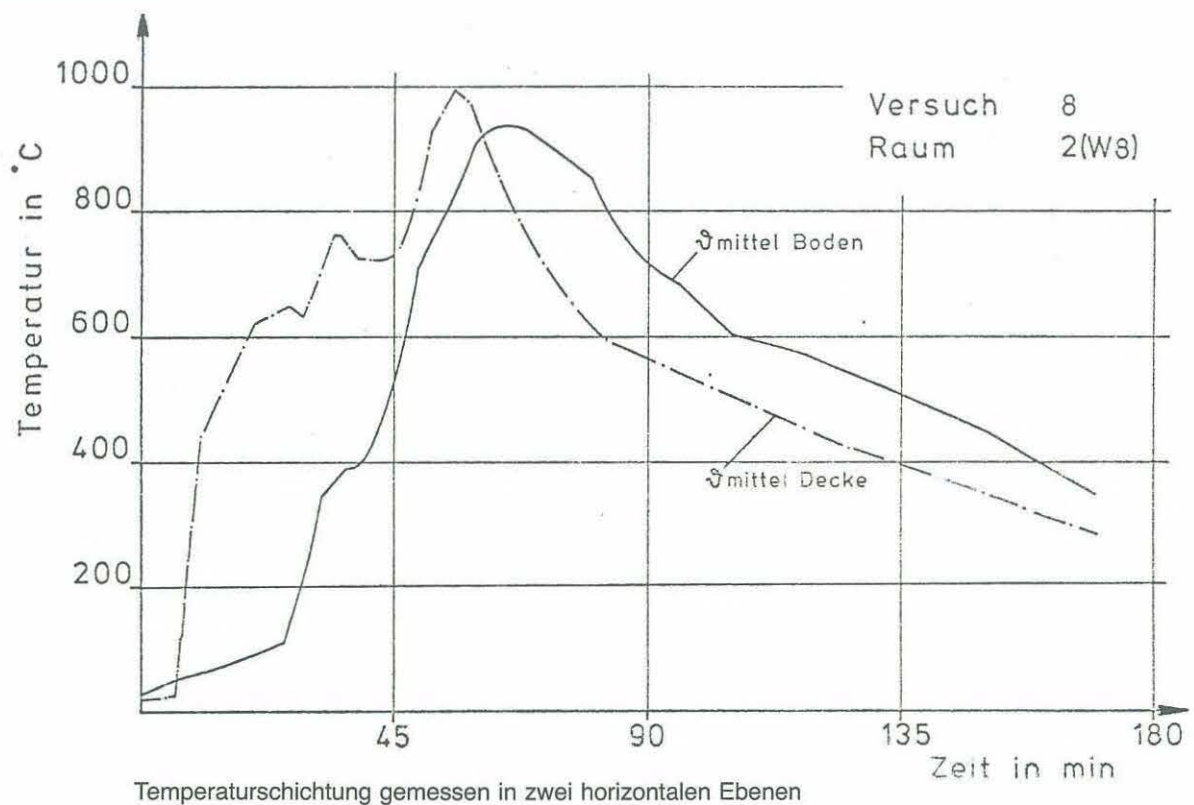


Temperaturstrebereich in einem Brandraum

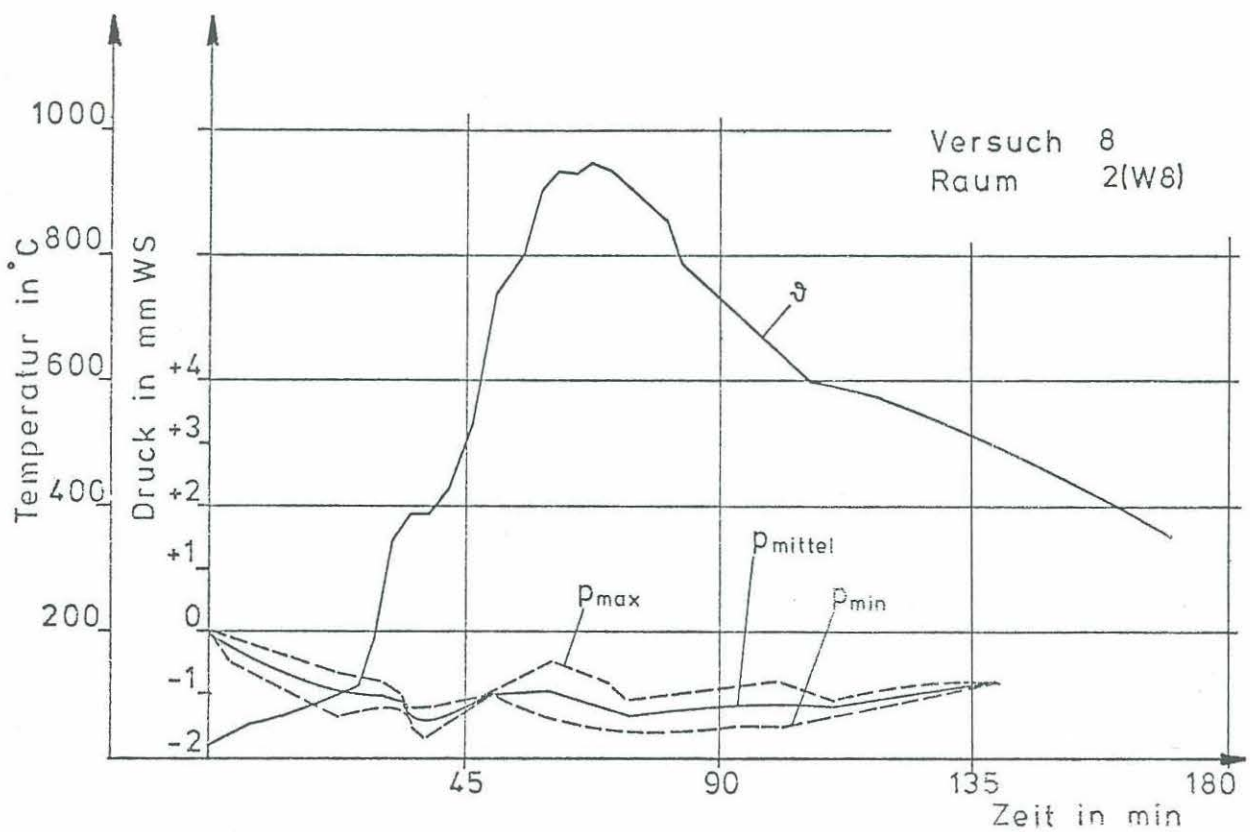
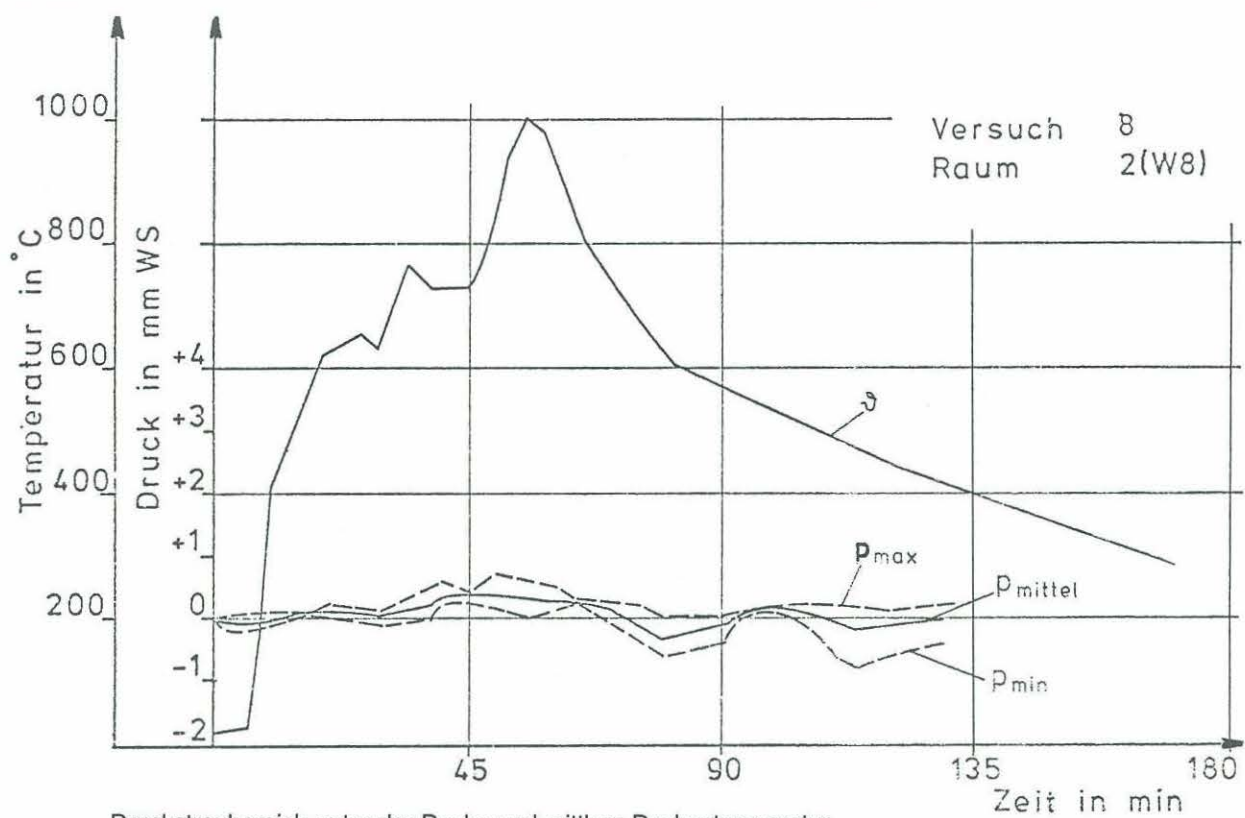


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

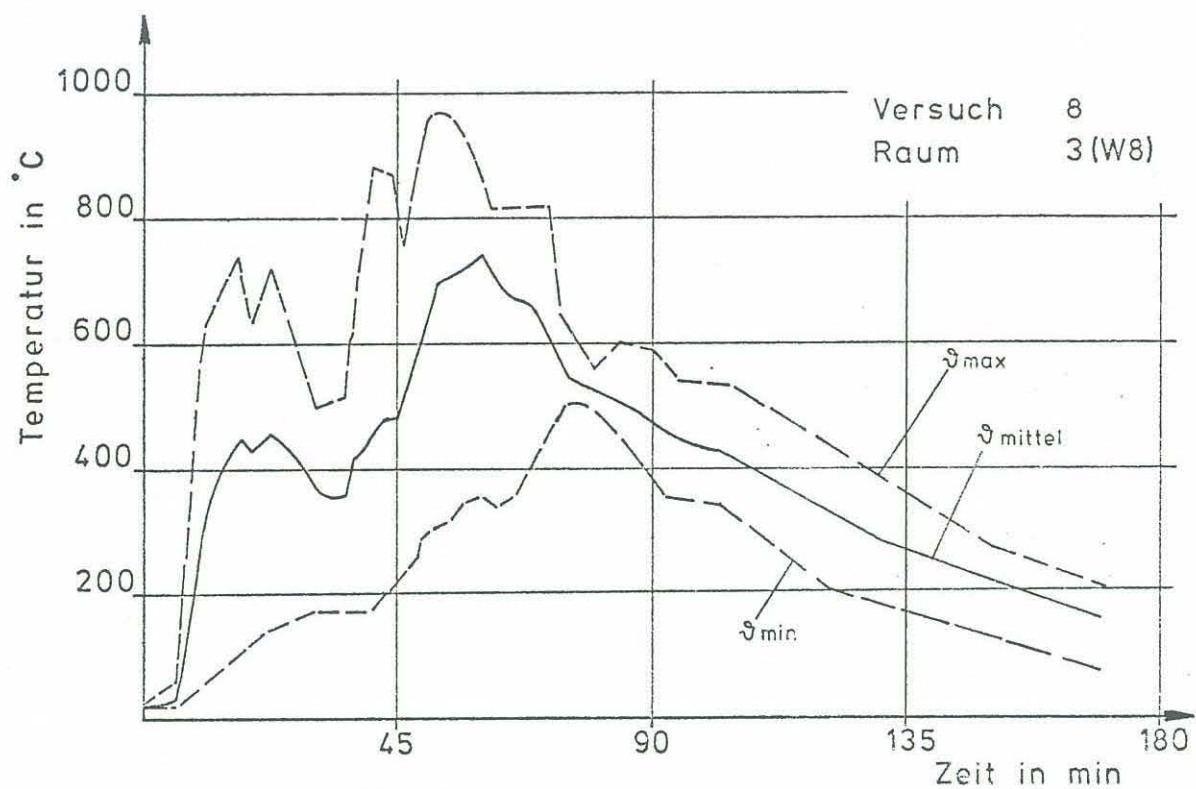
Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 5
Kap. 6.1 Nr. 6



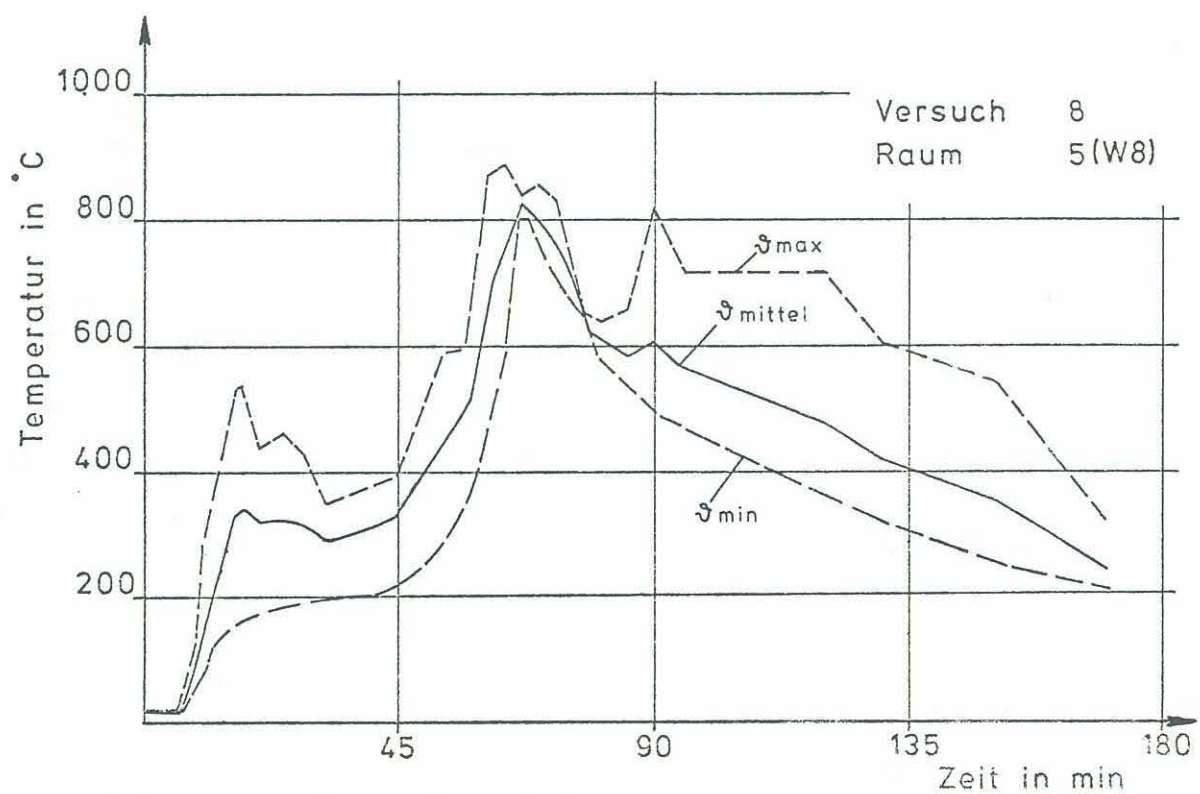
Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 7
Kap. 6.1 Nr. 8



Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 9
Kap. 6.1 Nr. 10

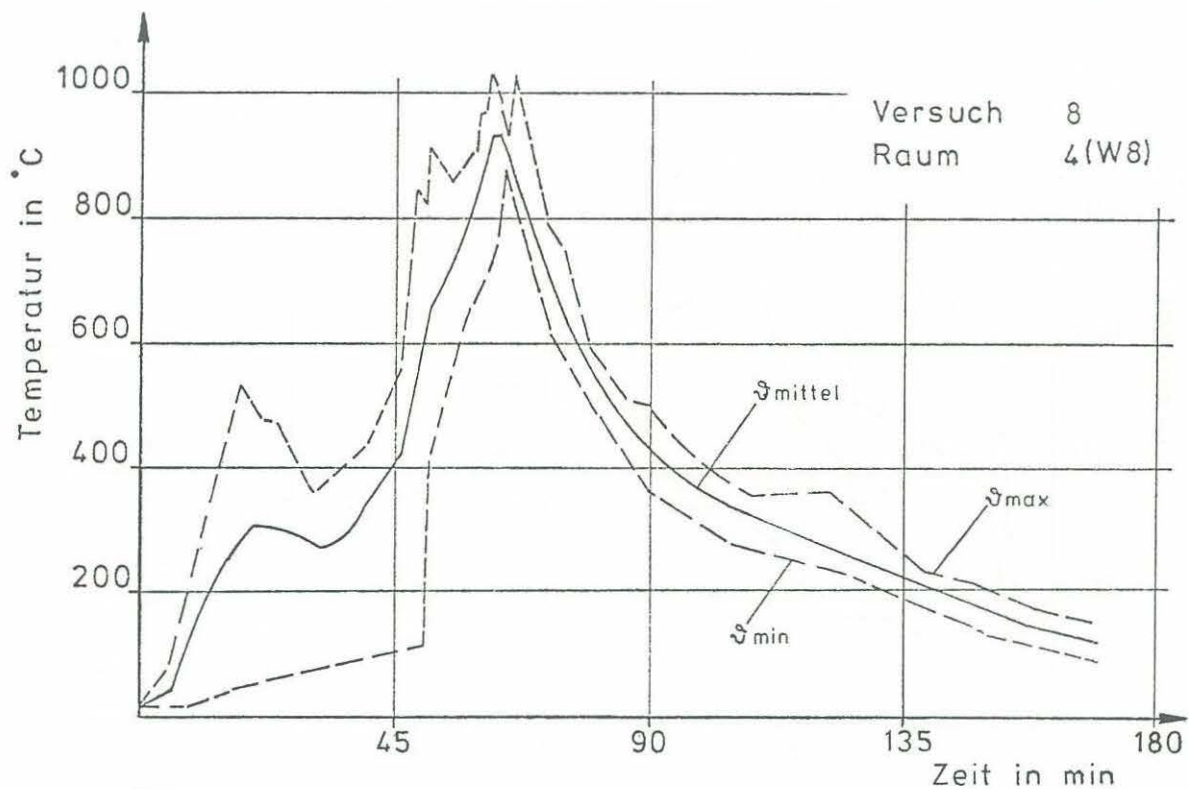


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

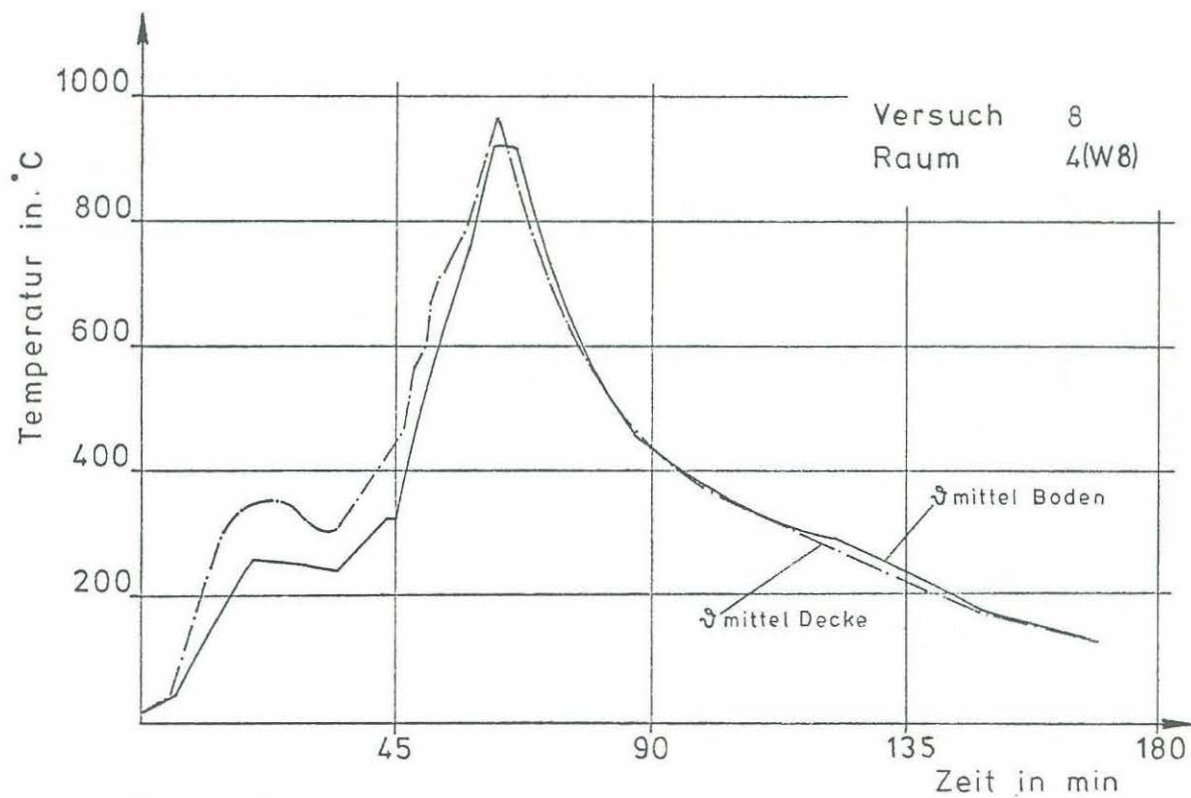


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 11
Kap. 6.1 Nr. 12

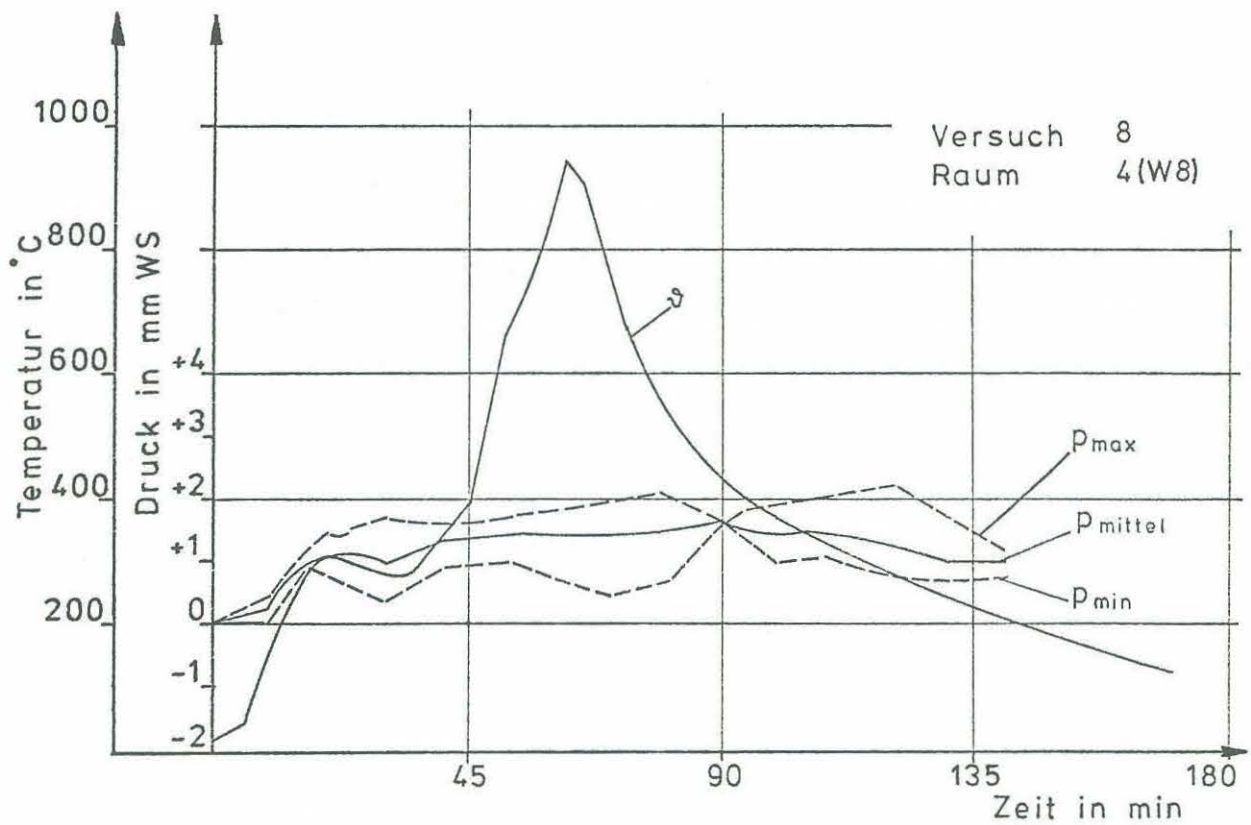


Temperaturstreuung in einem Brandraum

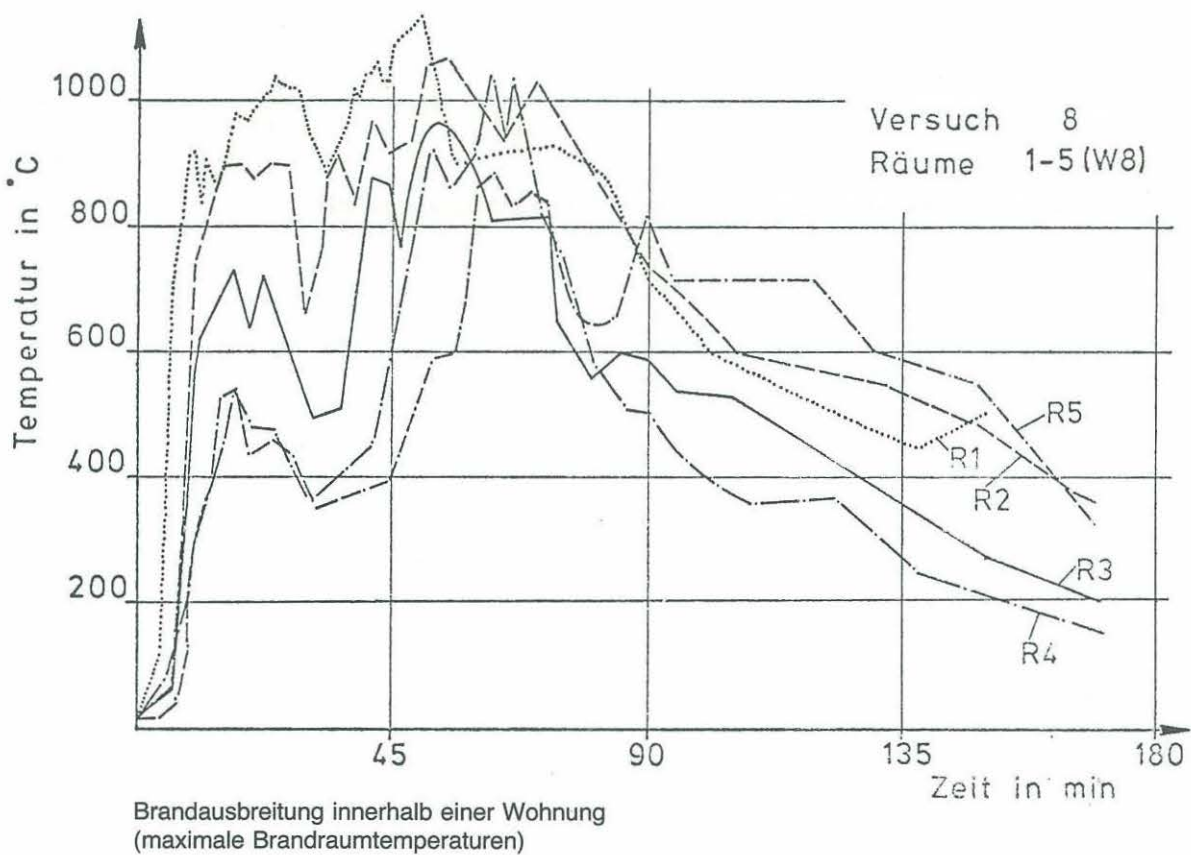
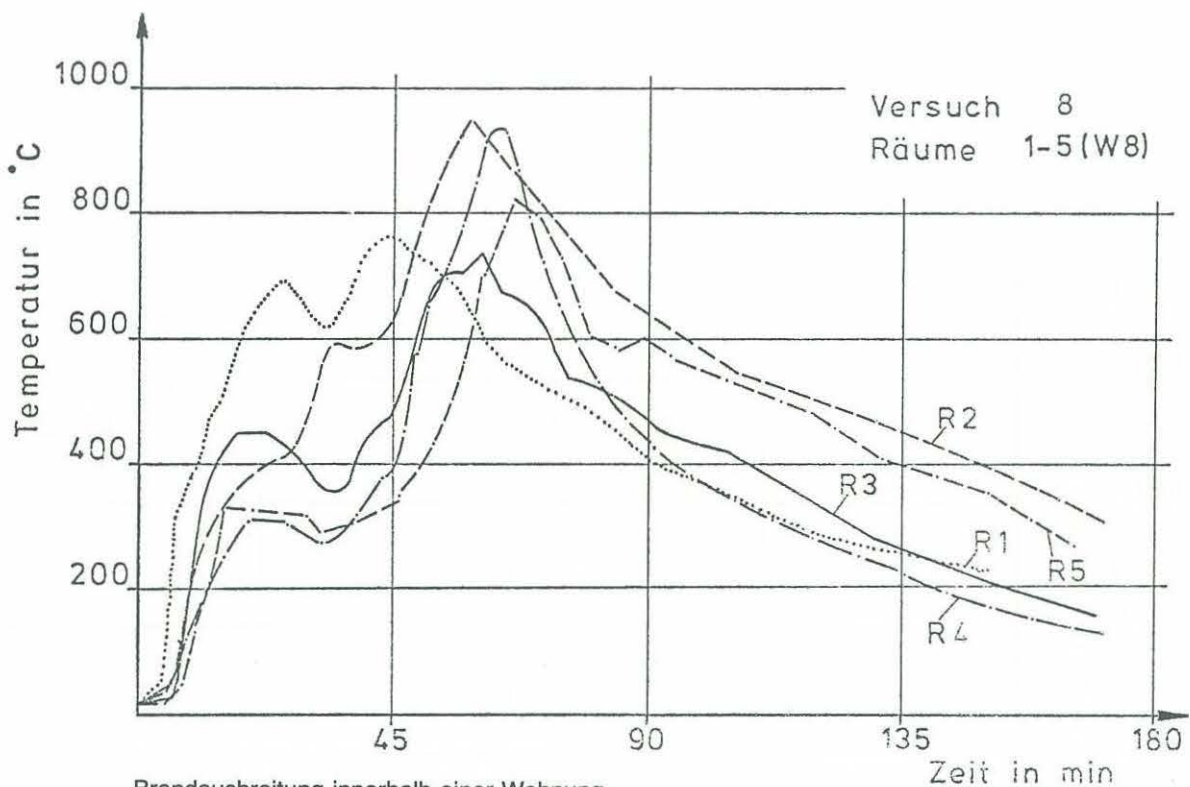


Temperaturschichtung gemessen in zwei horizontalen Ebenen

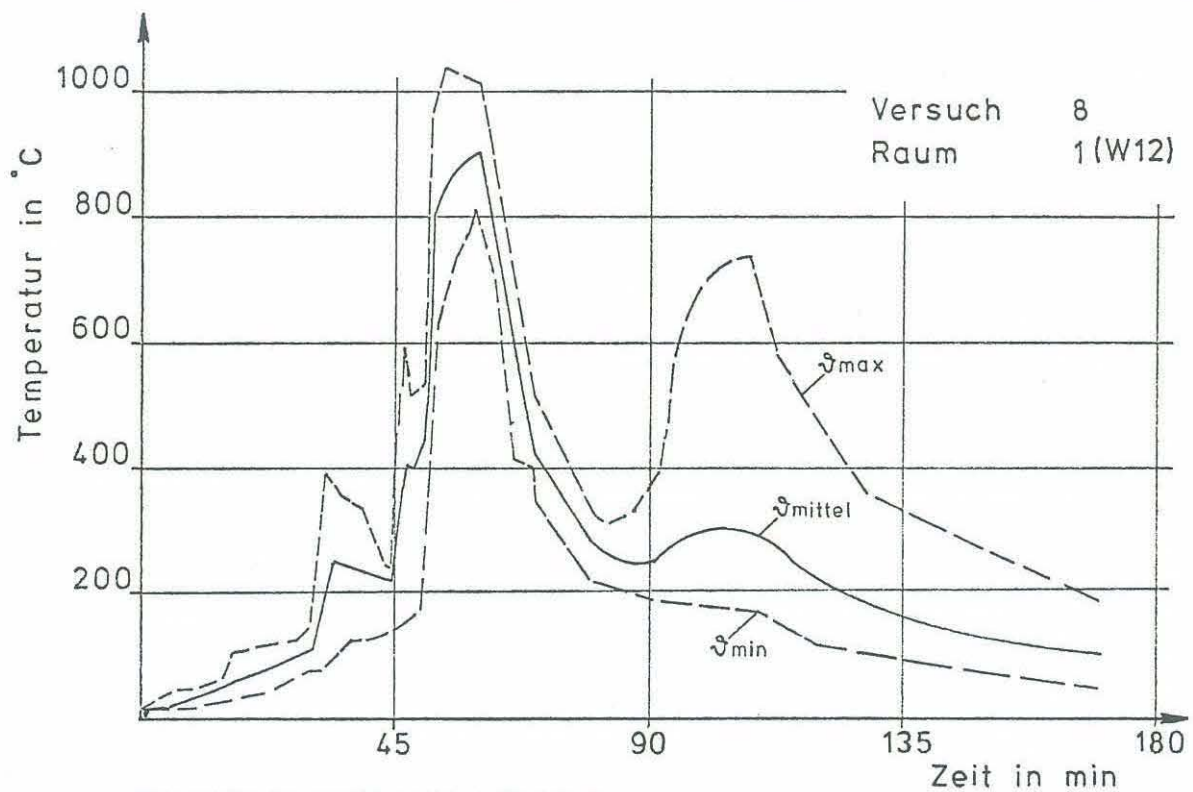
Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 13
Kap. 6.1 Nr. 14



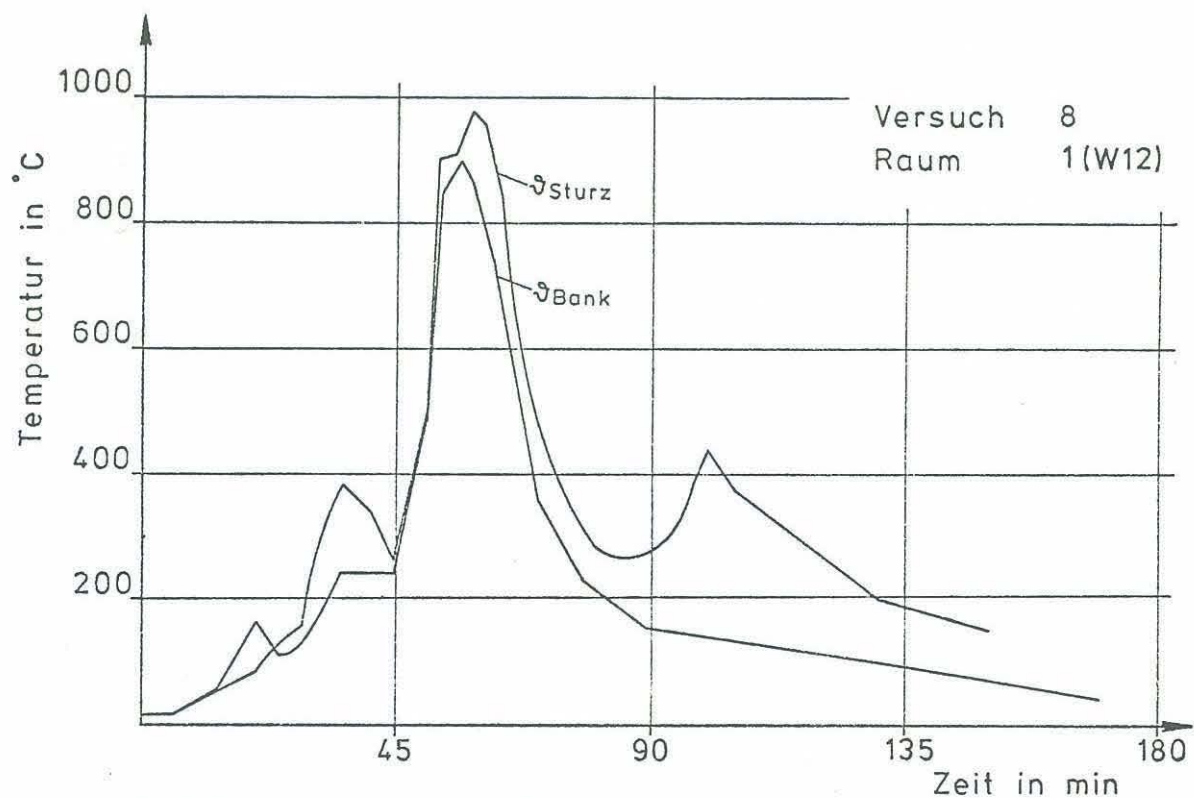
Druckstreibereich in einem Brandraum und mittlere Brandraumtemperatur



Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 16
Kap. 6.1 Nr. 17

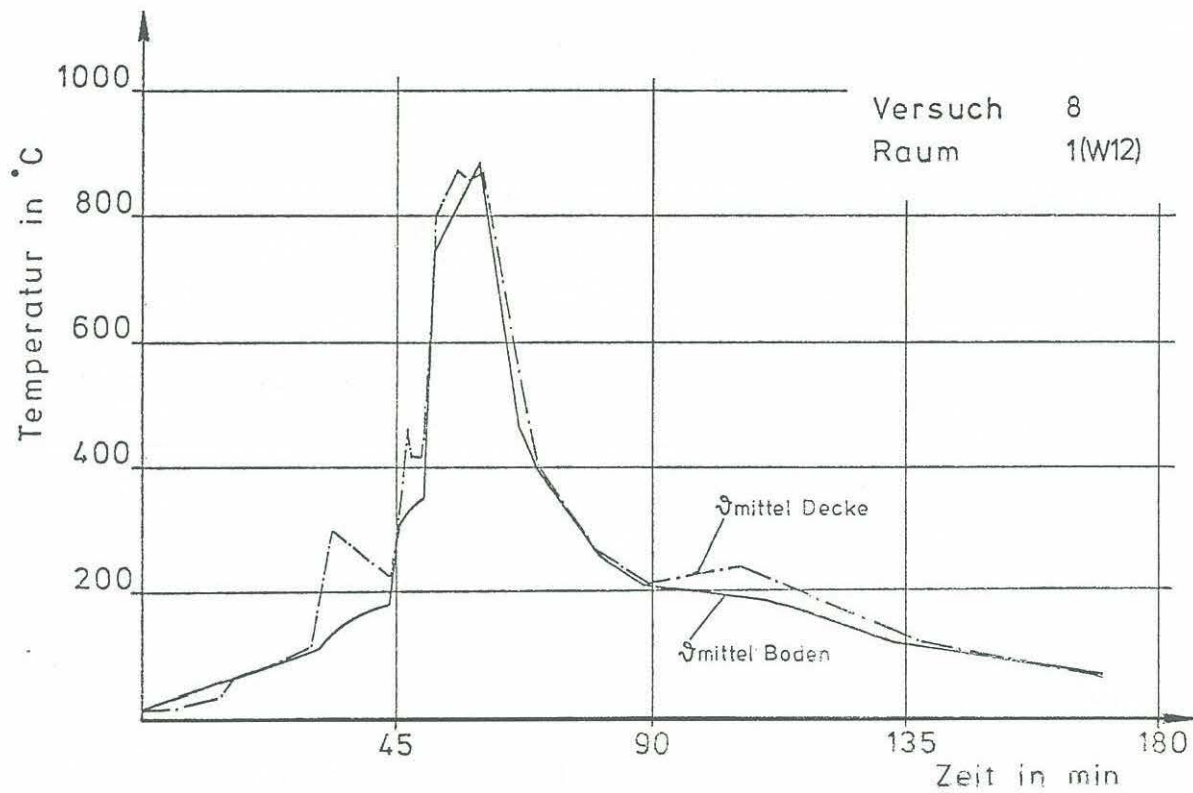


Temperaturstreibereich in einem Brandraum



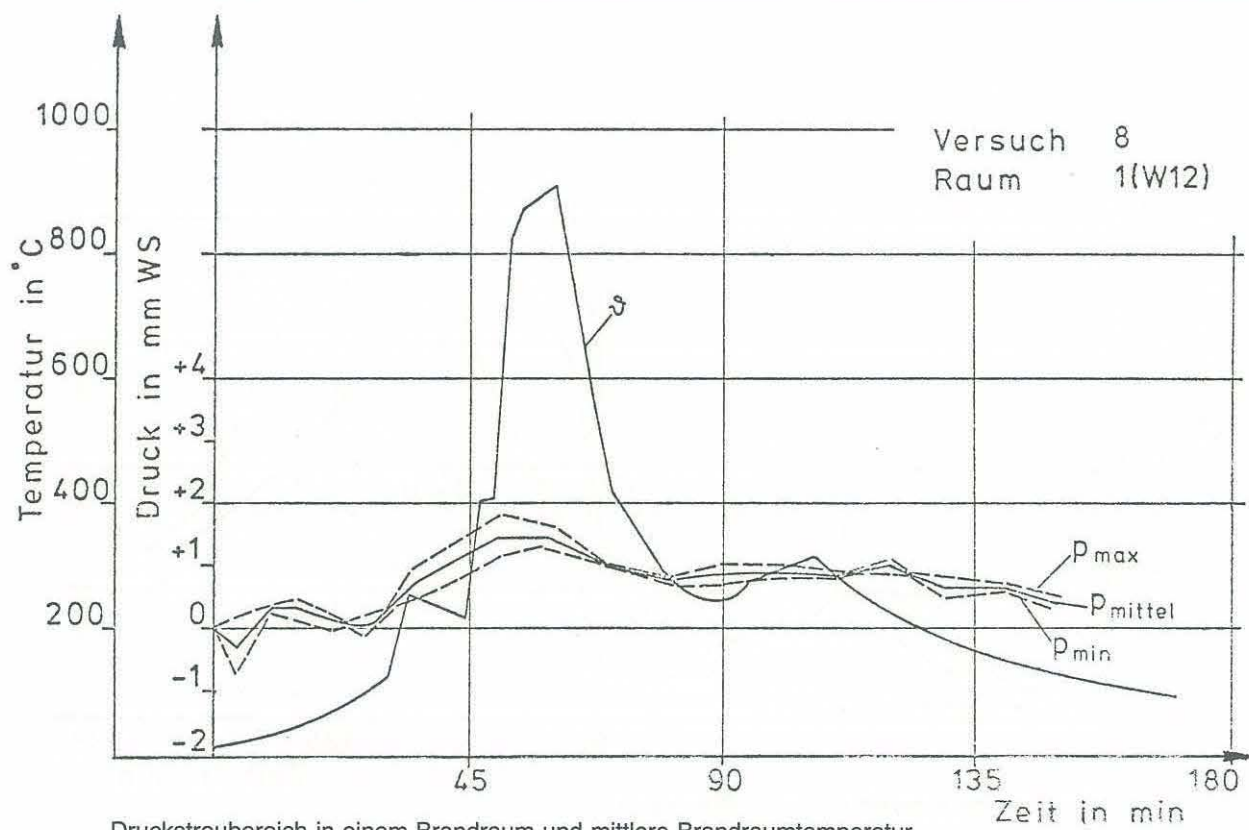
Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 18
Kap. 6.1 Nr. 19

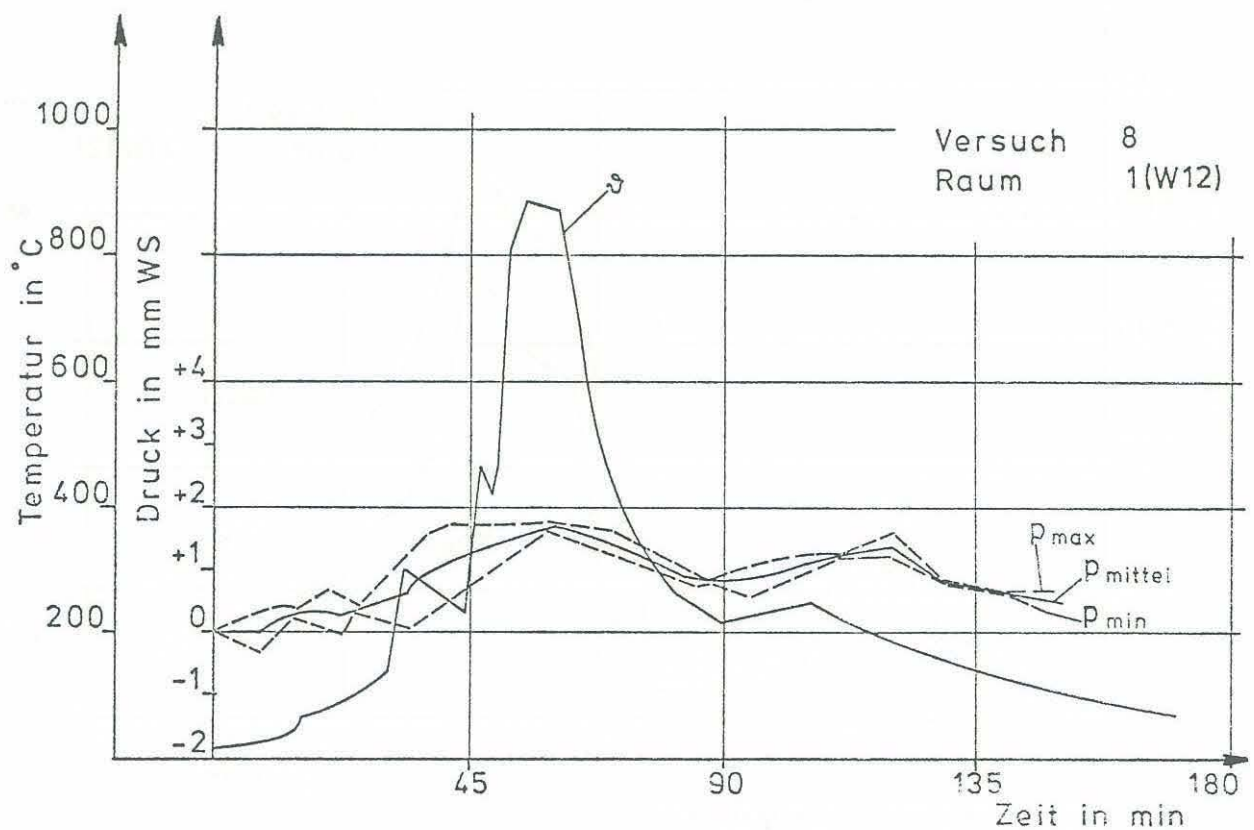


Temperaturschichtung gemessen in zwei horizontalen Ebenen

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 20

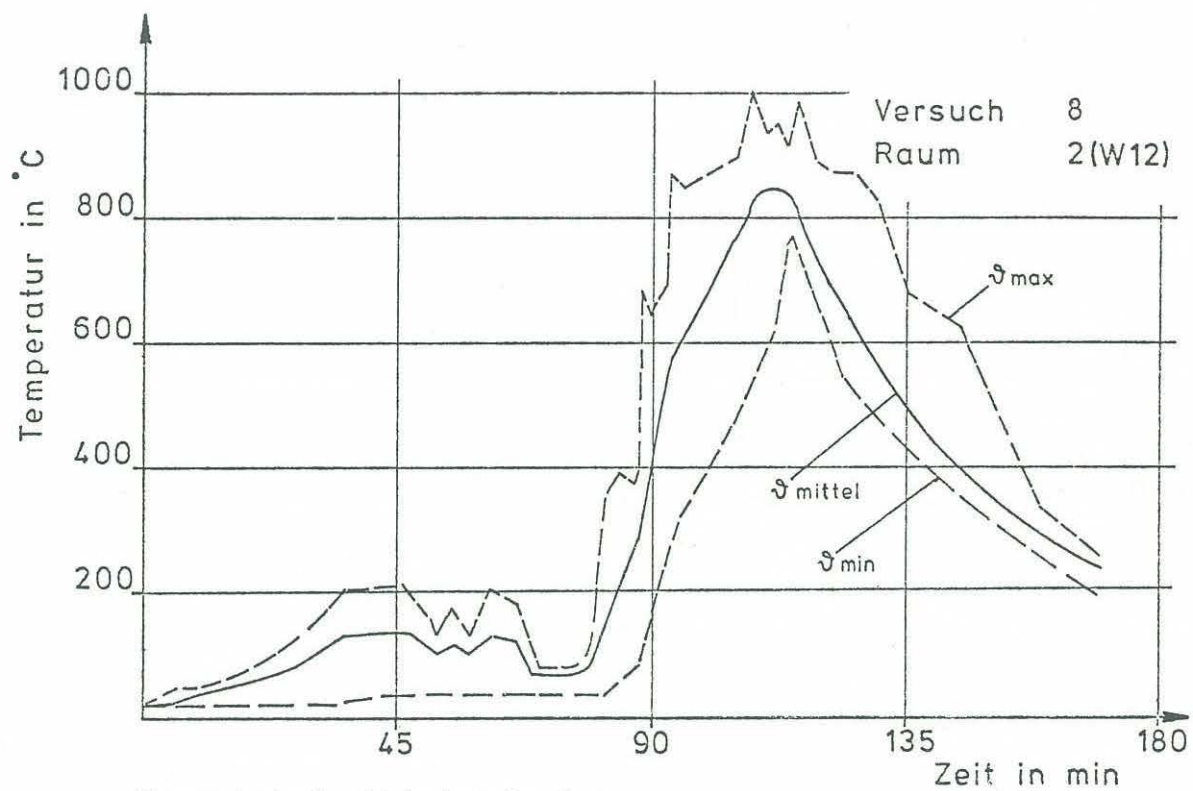


Druckstreibereich in einem Brandraum und mittlere Brandraumtemperatur

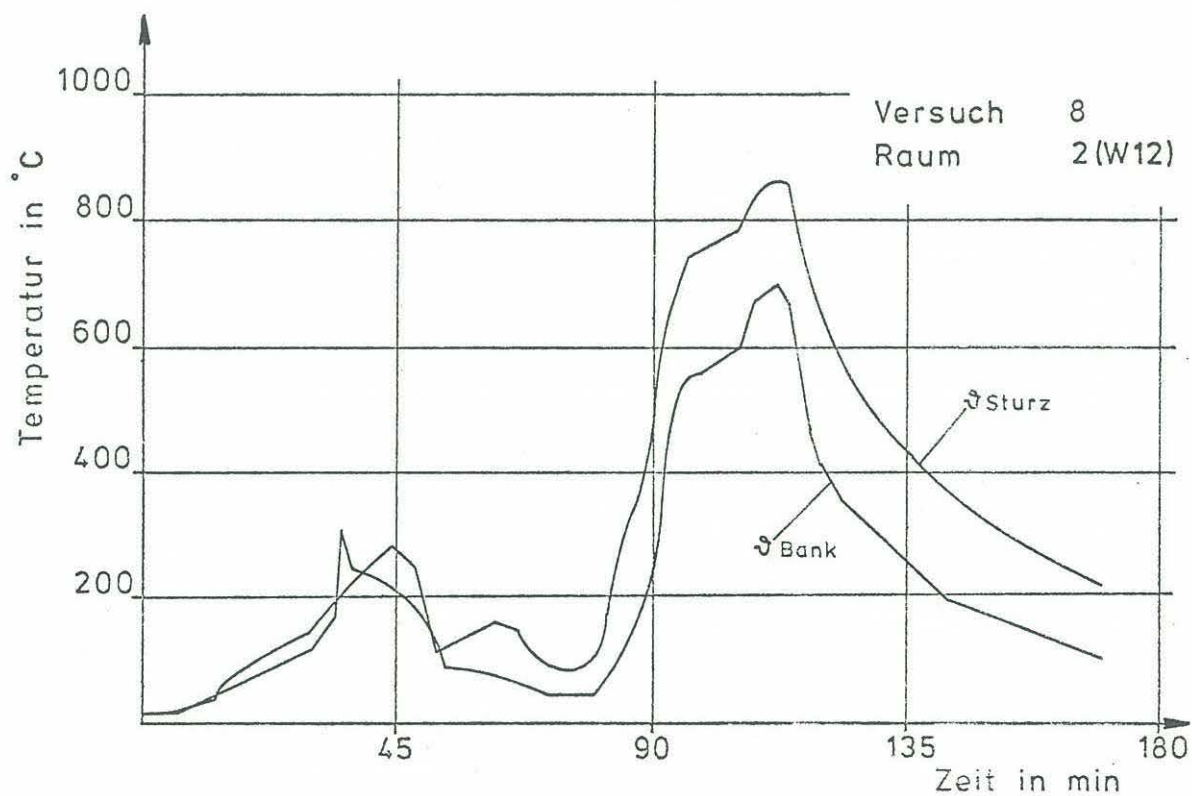


Druckstreibereich unter der Decke und mittlere Deckentemperatur

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 21
Kap. 6.1 Nr. 22

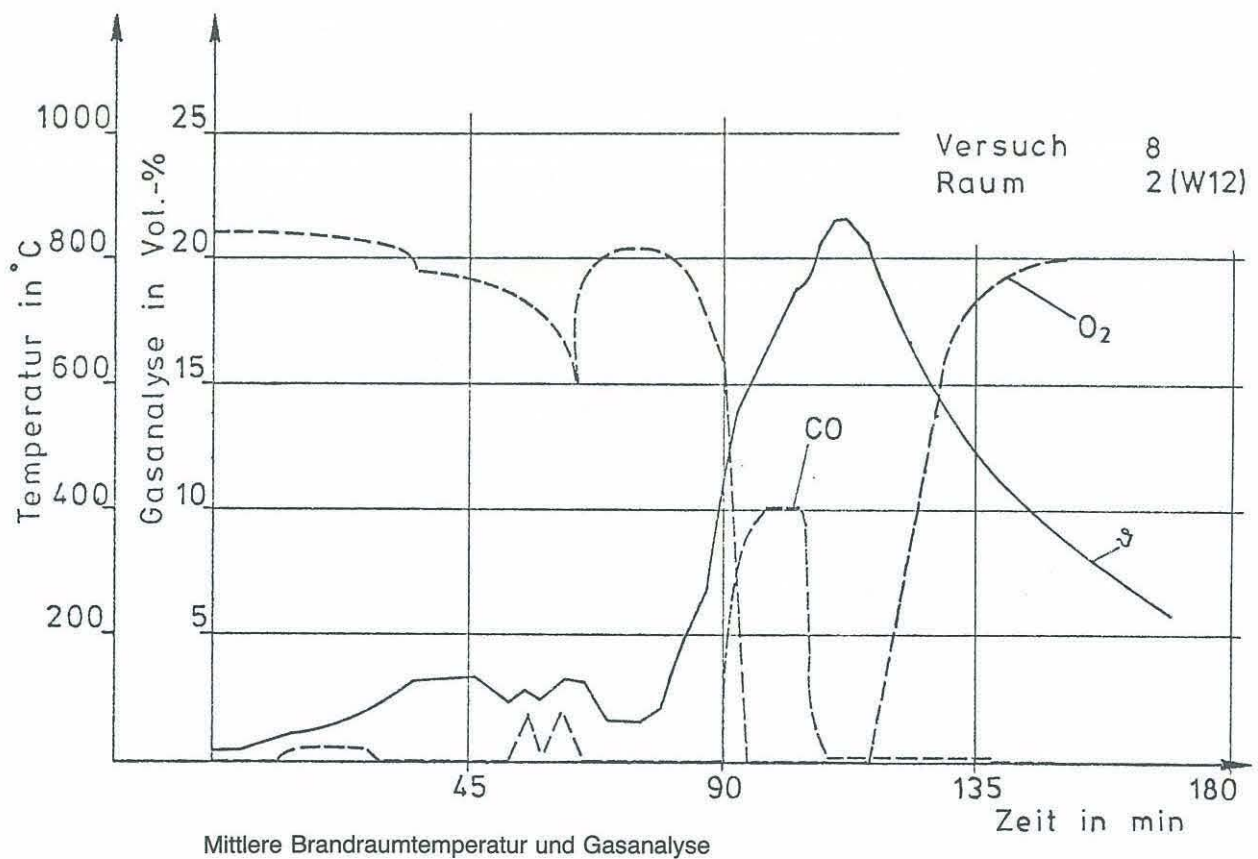
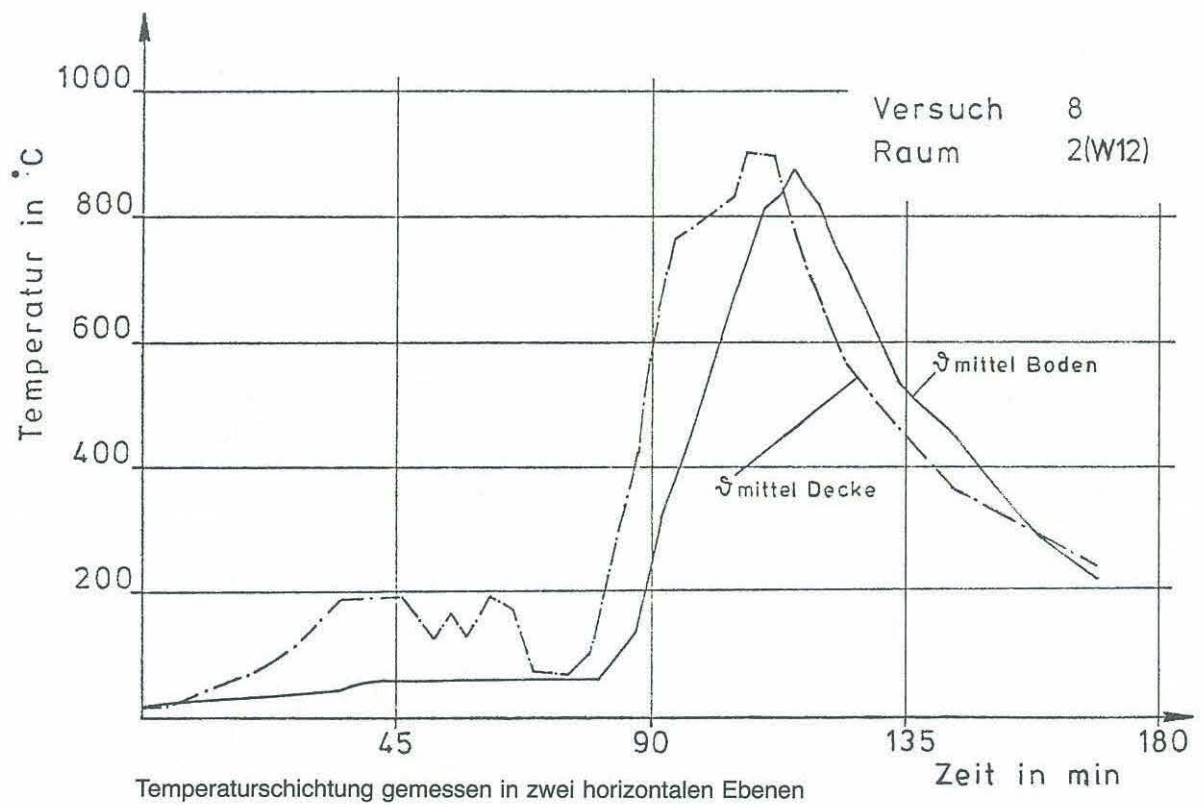


Temperaturstreibereich in einem Brandraum

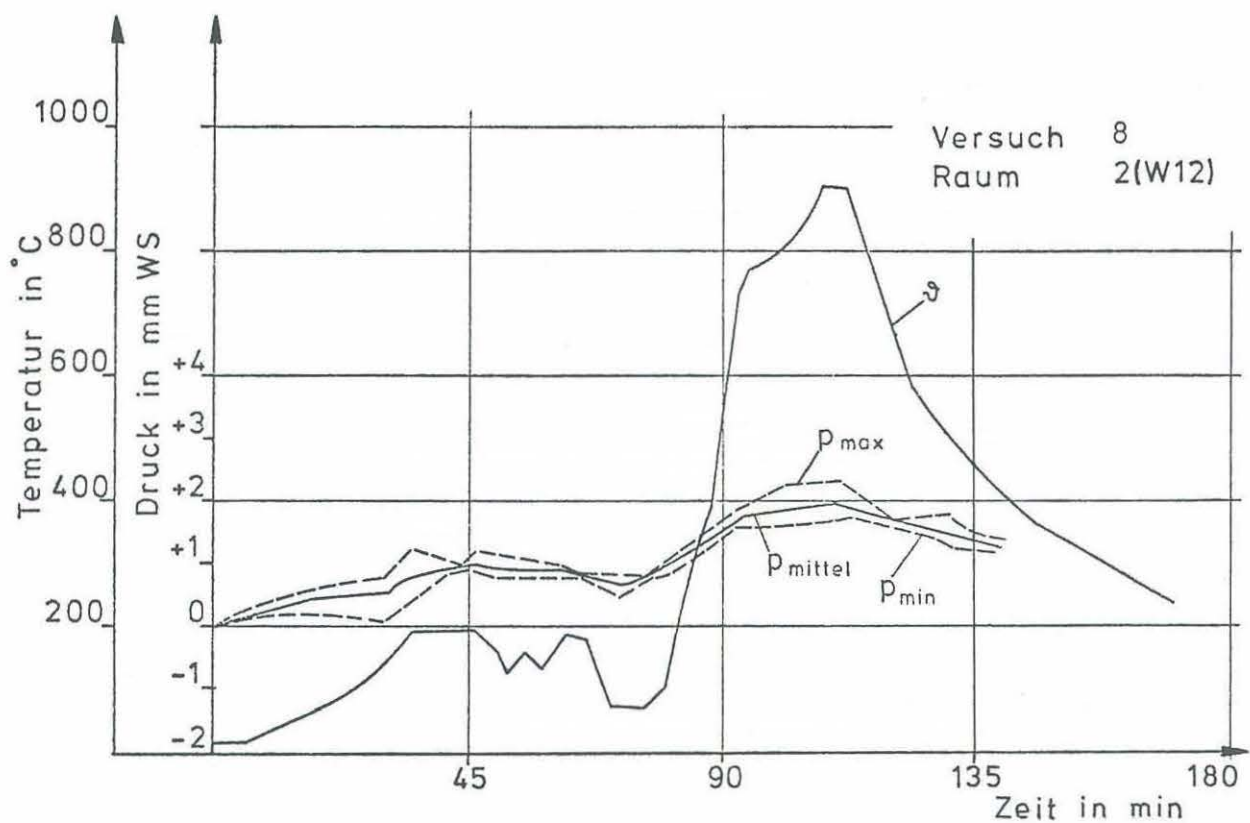


Fenstertemperaturen in einem Brandraum

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 23
Kap. 6.1 Nr. 24

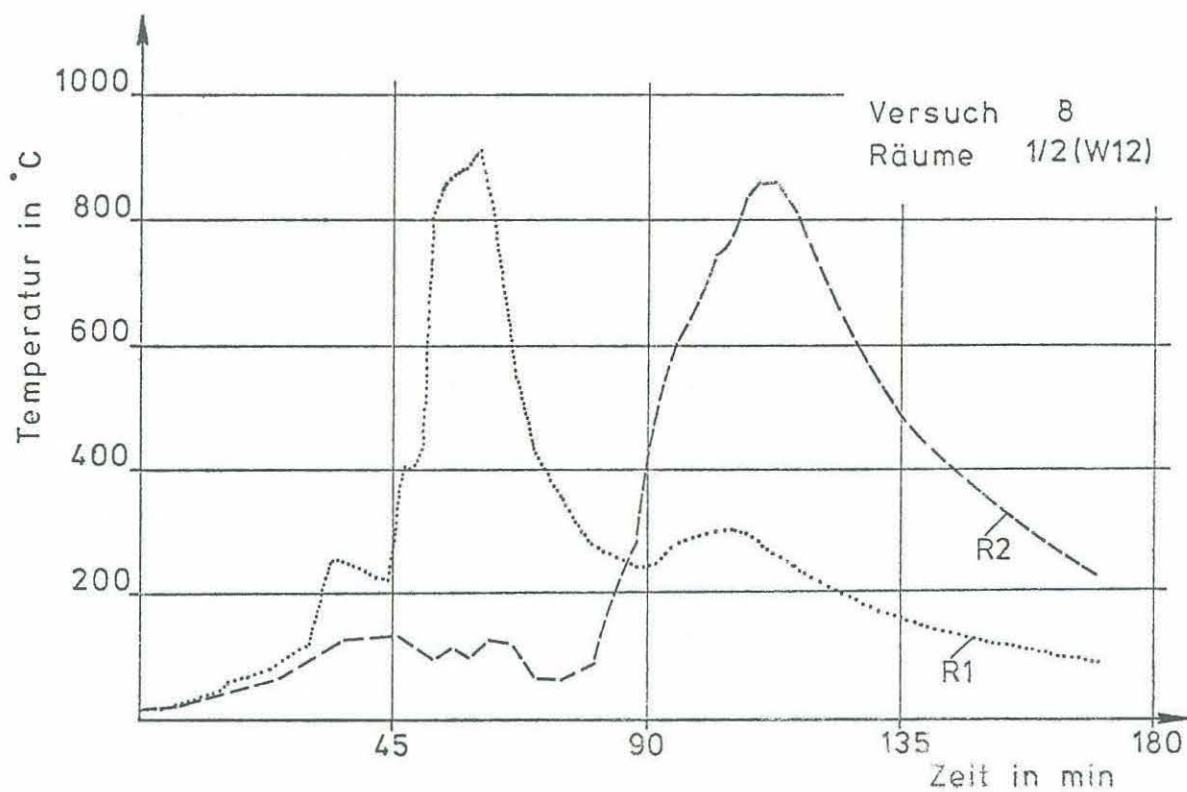


Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 25
Kap. 6.1 Nr. 26

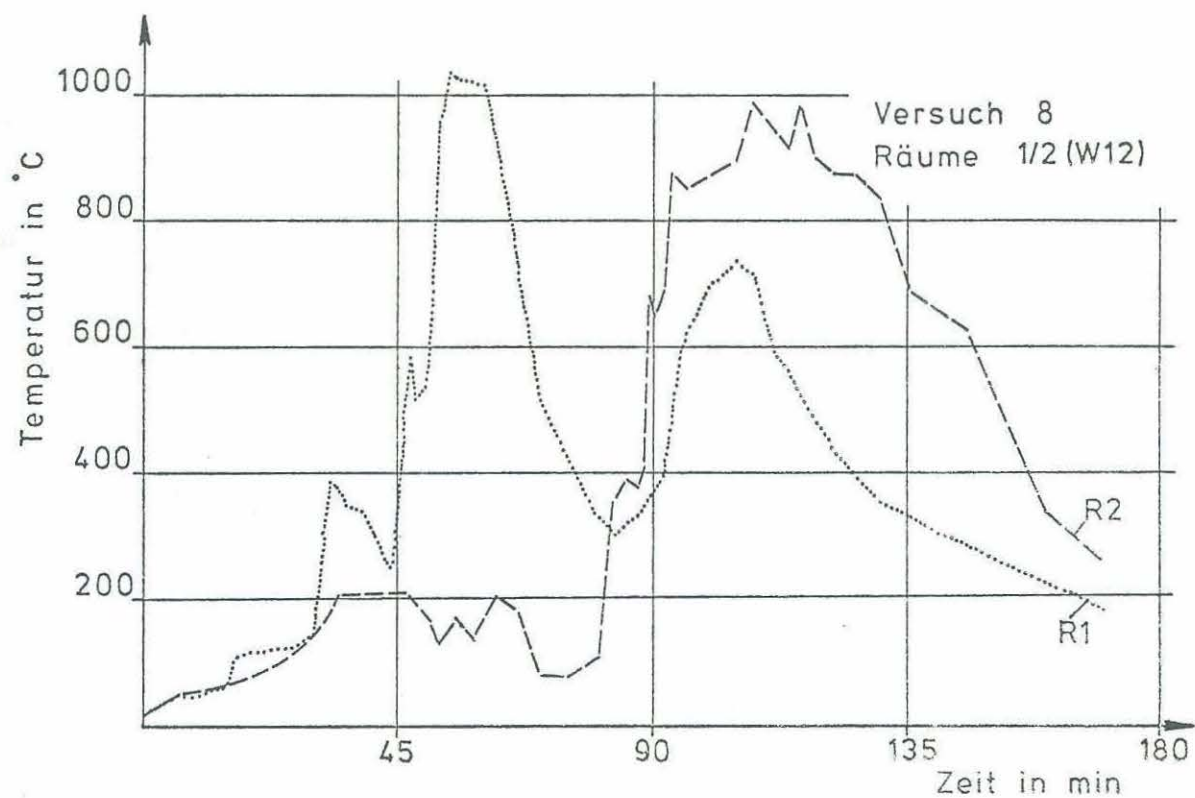


Druckstreibereich unter der Decke und mittlere Deckentemperatur

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 27

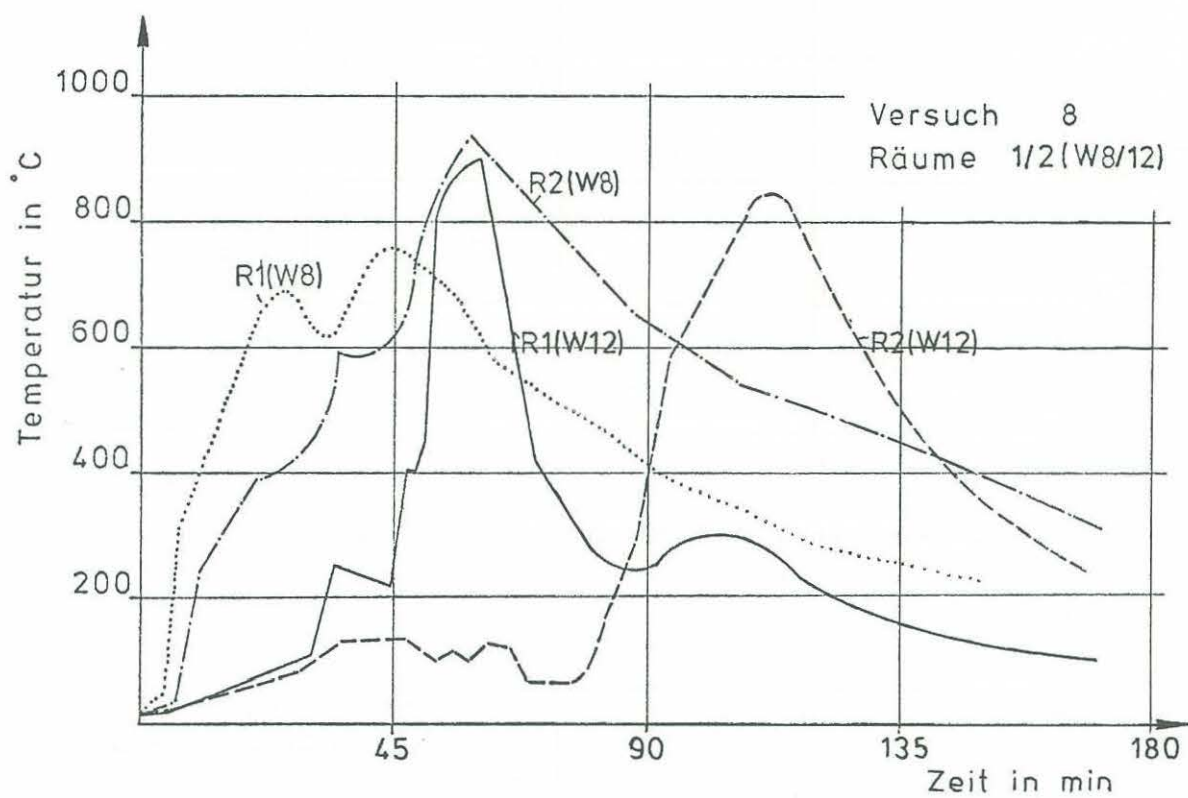


Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (mittlere Brandraumtemperatur)

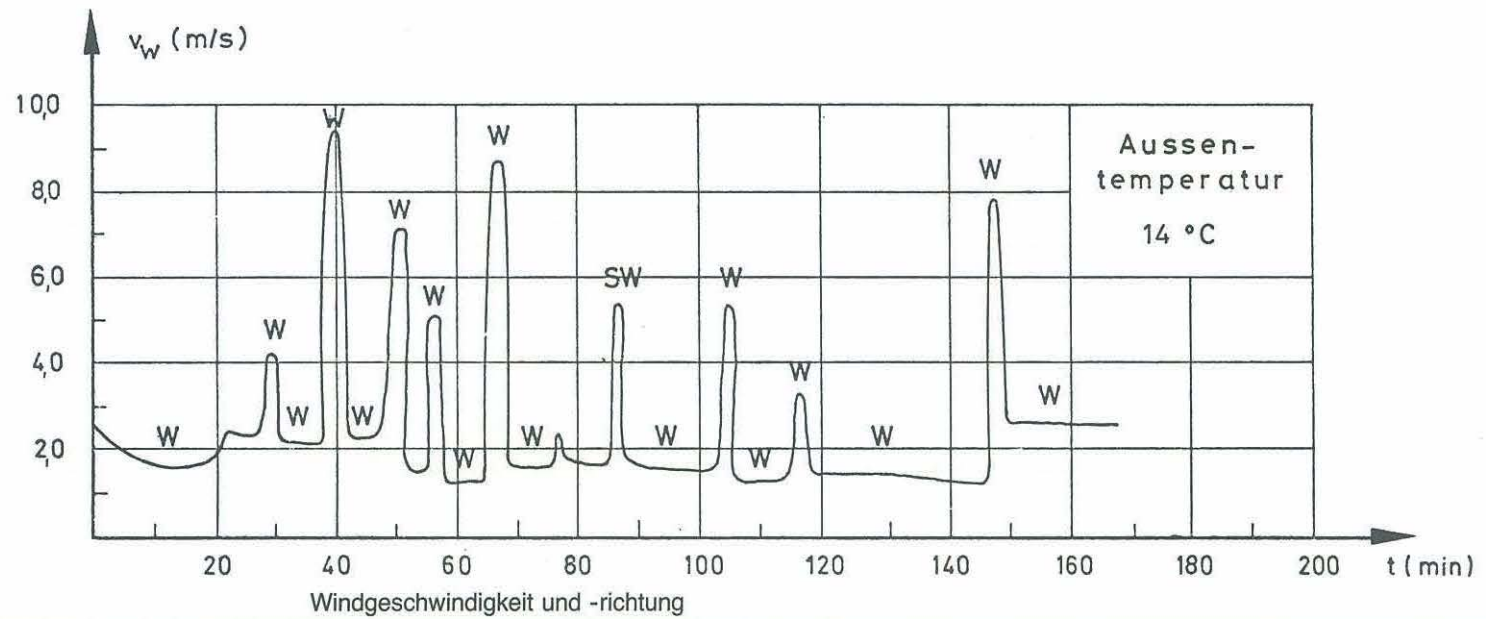
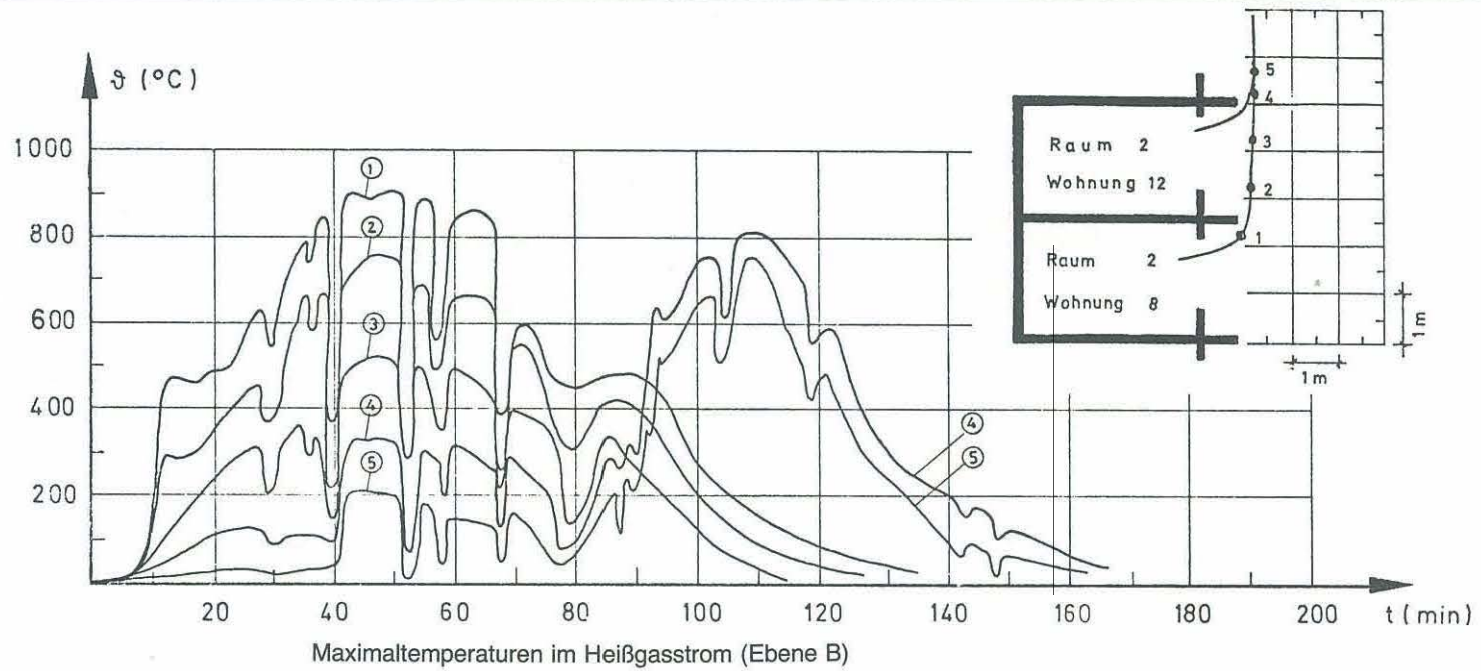


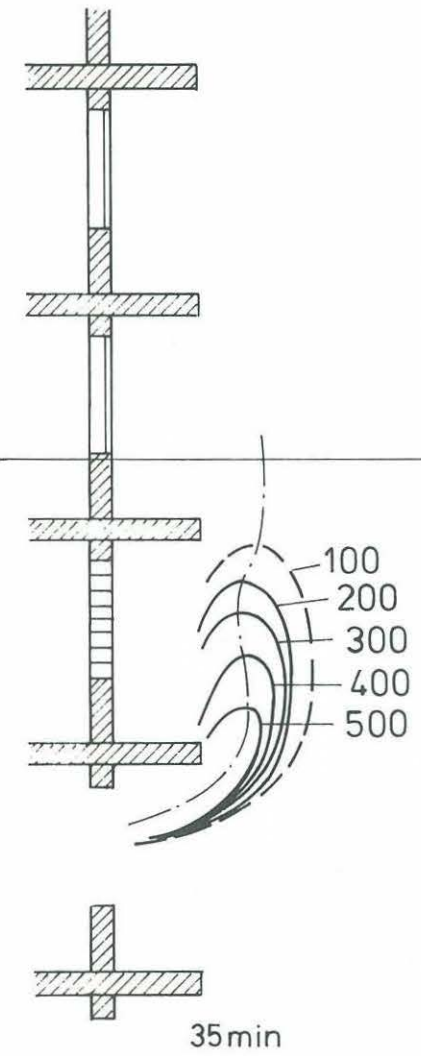
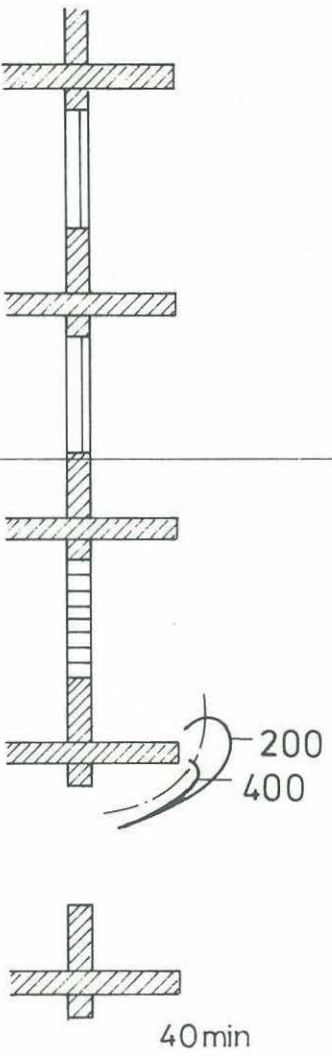
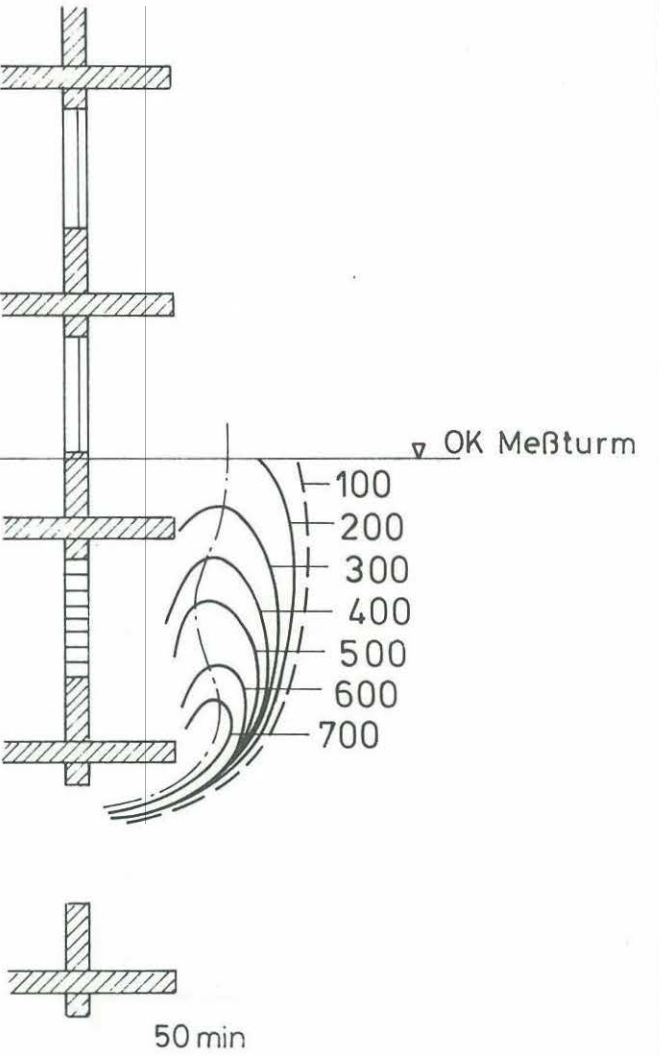
Brandausbreitung innerhalb einer Wohnung (maximale Brandraumtemperaturen)

Anlage zum Versuch 8
Kap. 6.1 Nr. 28
Kap. 6.1 Nr. 29



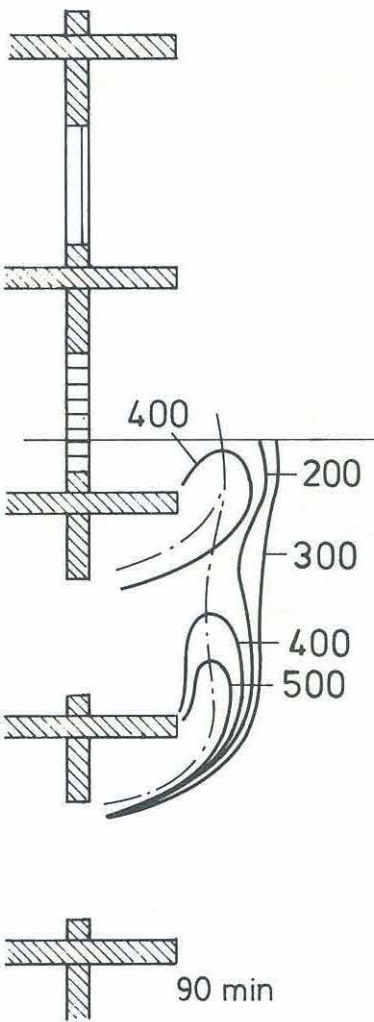
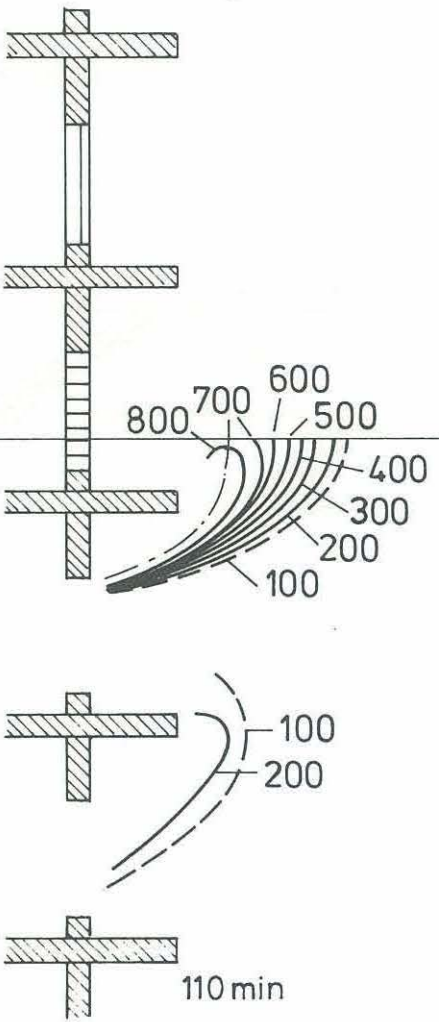
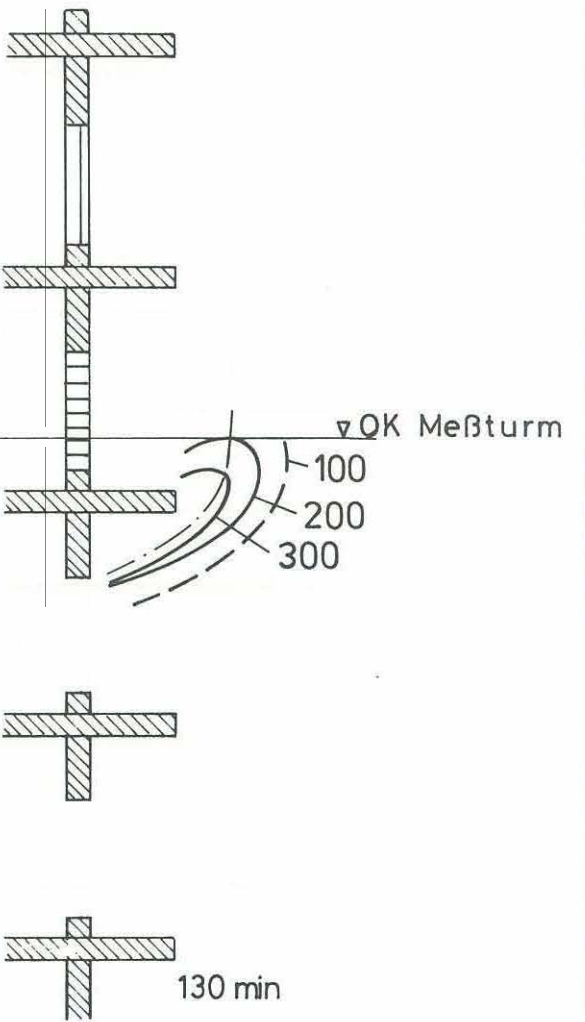
Feuerübersprung von Stockwerk zu Stockwerk (mittlere Brandraumtemperaturen)



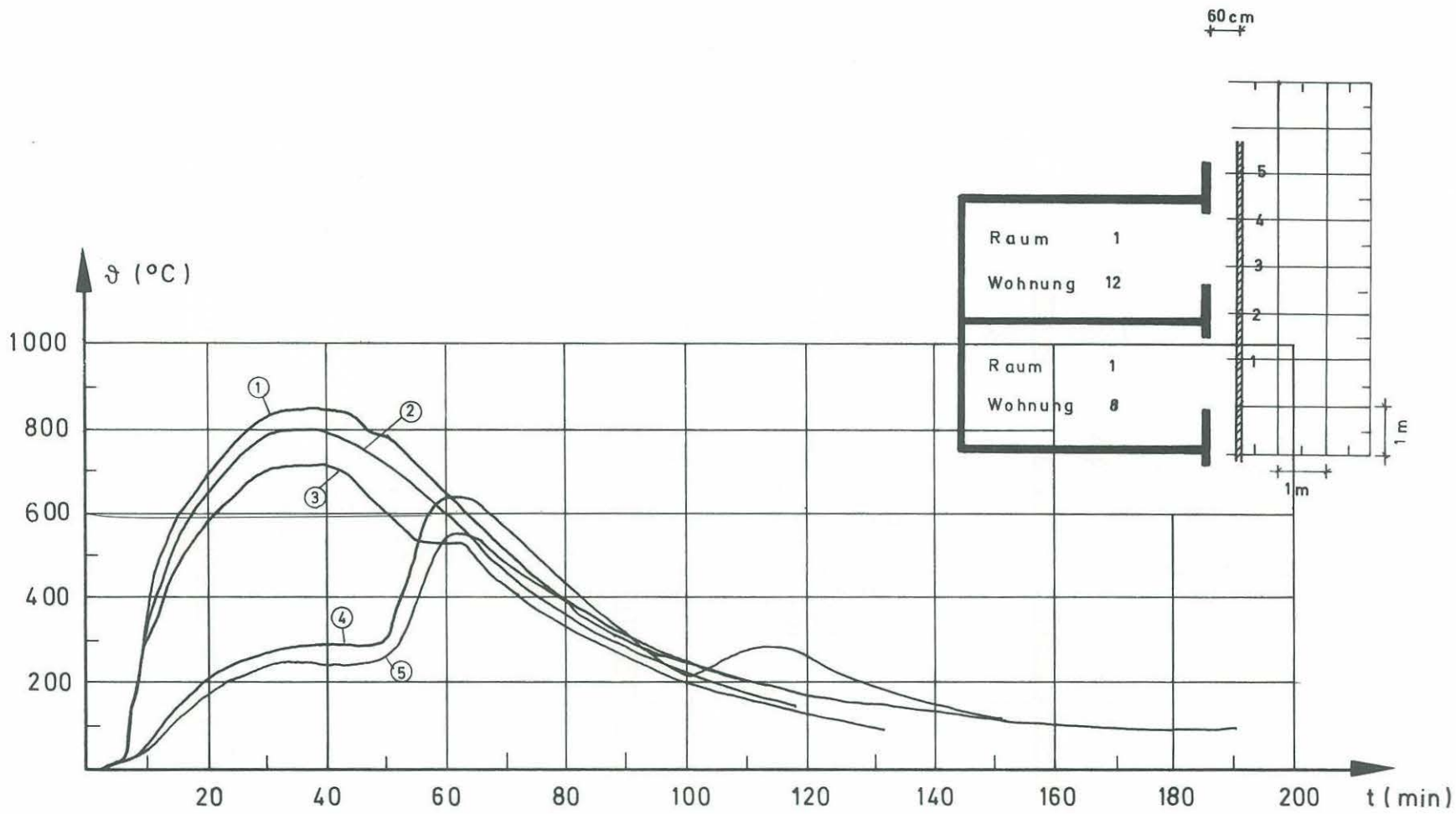


Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Ebene B)

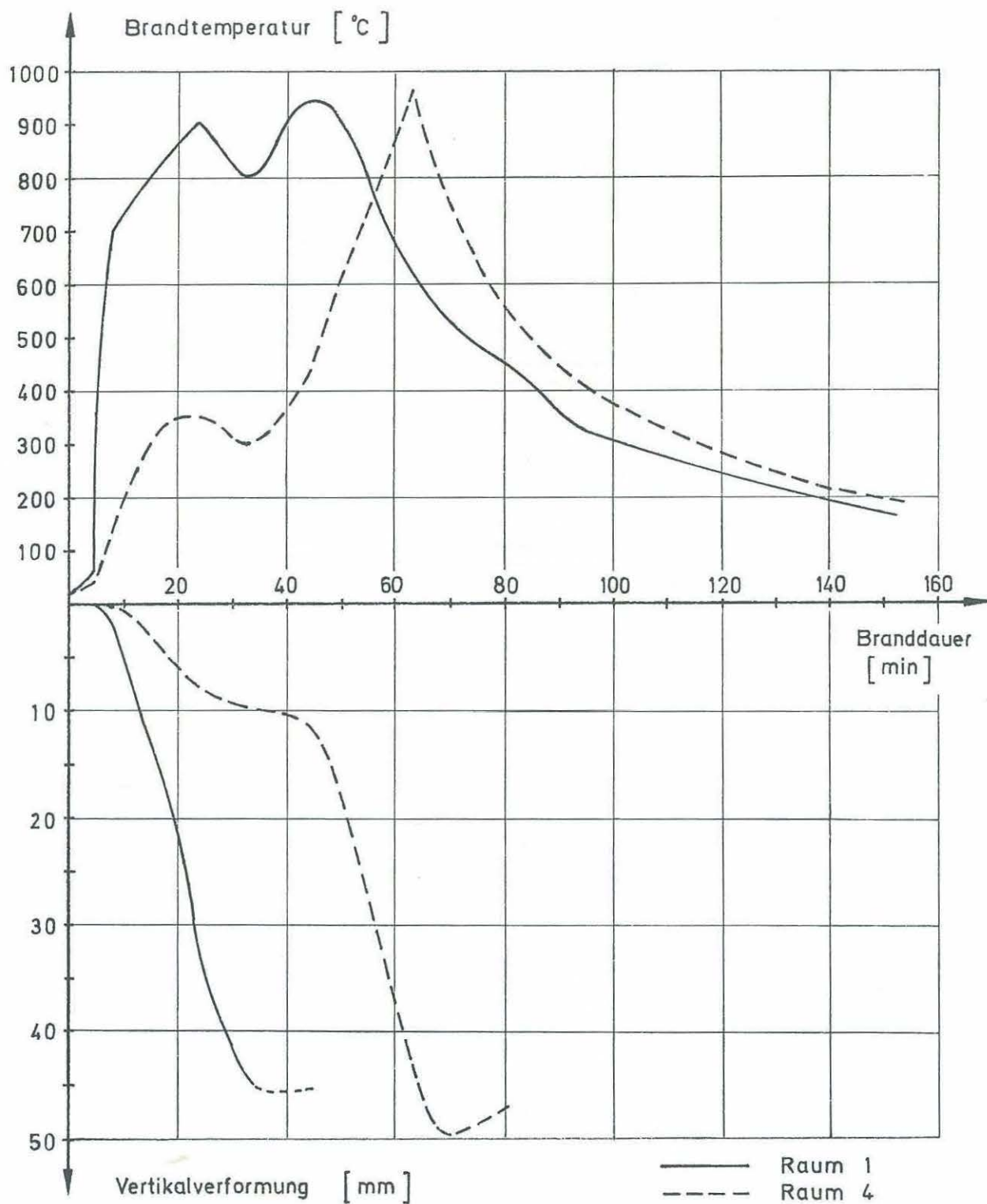
Anlage zum Versuch
Nr. 8
Kap. 6.2



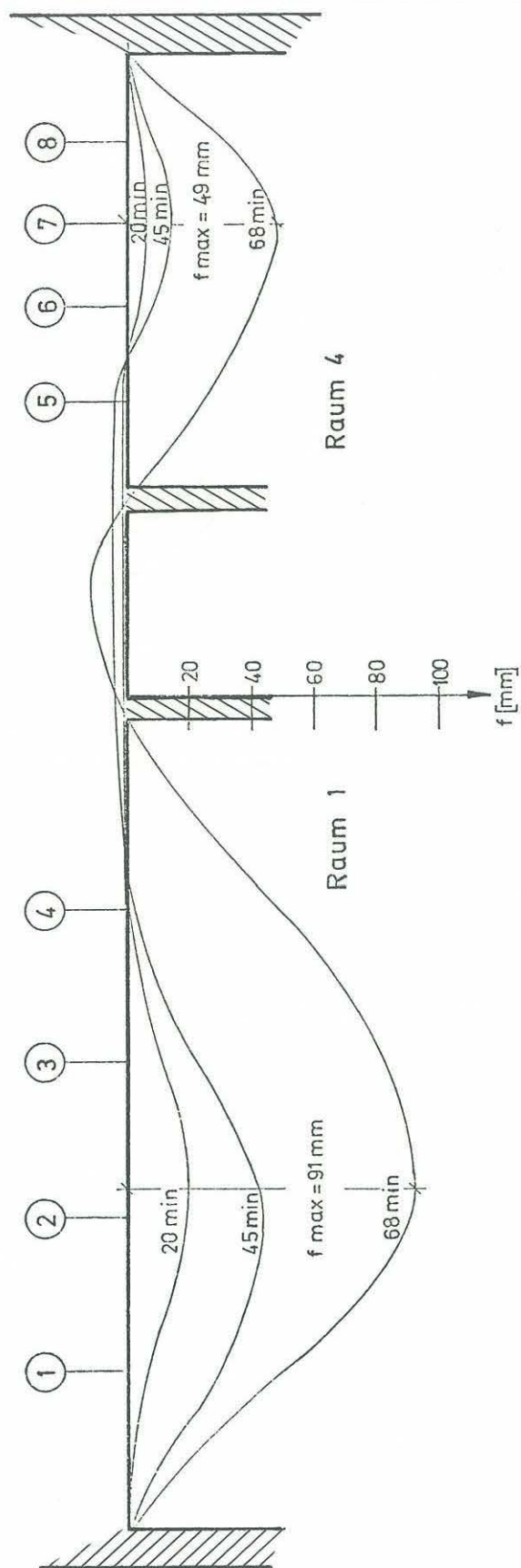
Isothermendarstellung des Temperaturfeldes vor der Fassade (Ebene B)



Temperaturen im Heißgasstrom vor der Fassade (10 cm neben dem I140) auf einer senkrechten Meßlinie 0,60 m vor der Frontwand

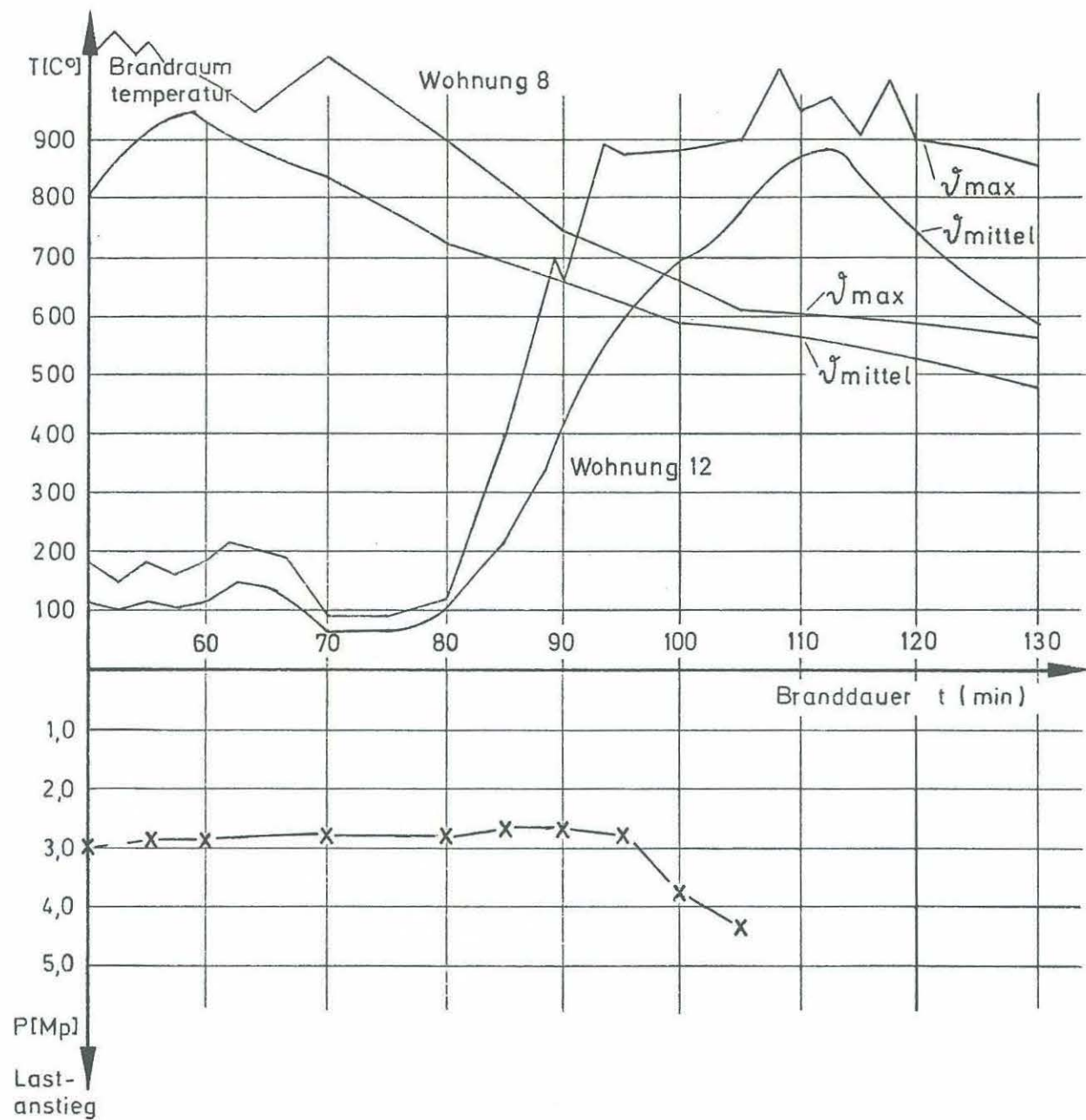


Brandraumtemperaturen Wohnung 8 – Maximalverformungen Decke über Wohnung 8



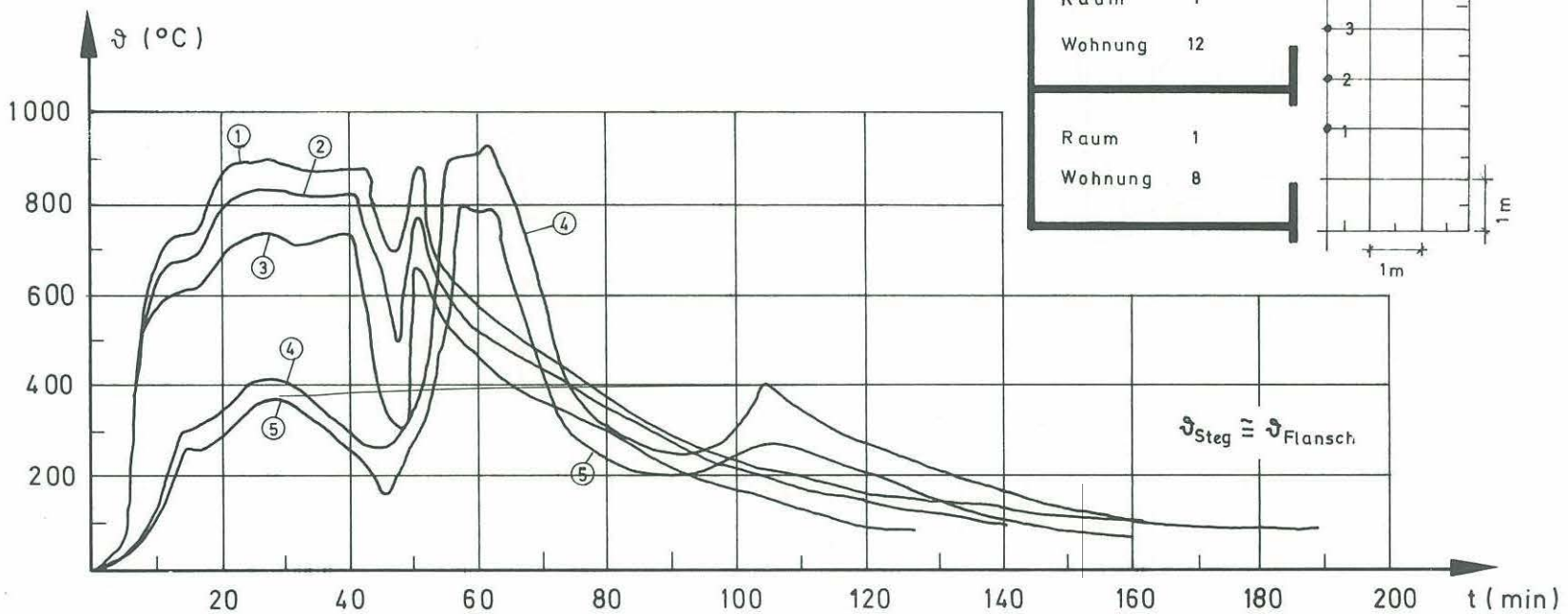
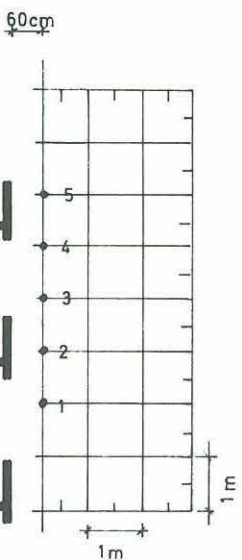
Biegelinie Decke über Wohnung 8, Raum 1 und 4

Anlage zum Versuch 8
Kap. 7.1 Nr. 2



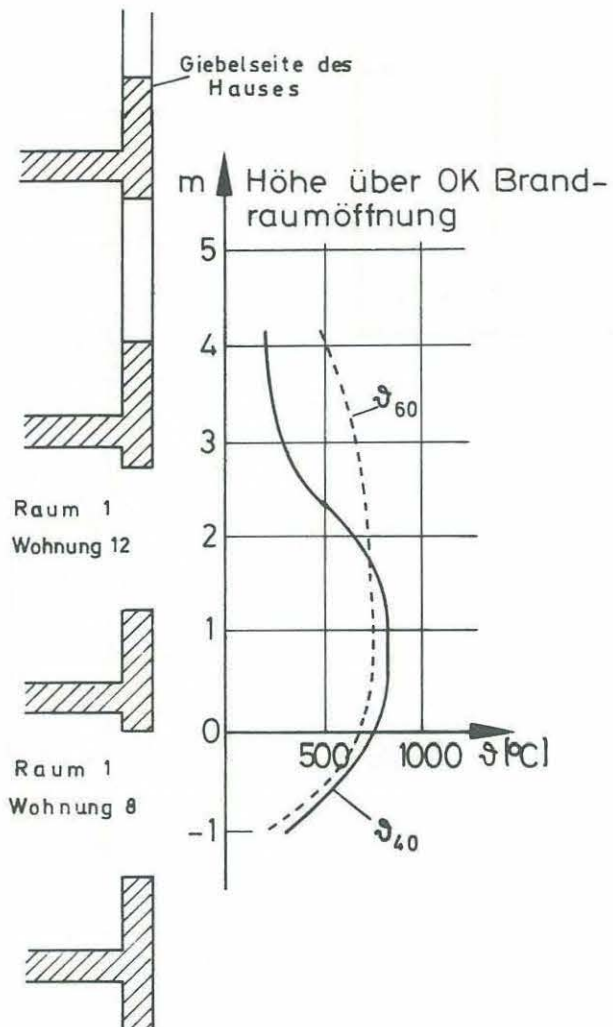
Lastabtragung auf 24 cm Wand zwischen Wohnung 8 und 7
und Brandraumtemperaturen in Wohnung 8 und 12

Anlage zum Versuch 8
Kap. 7.2 Nr. 1

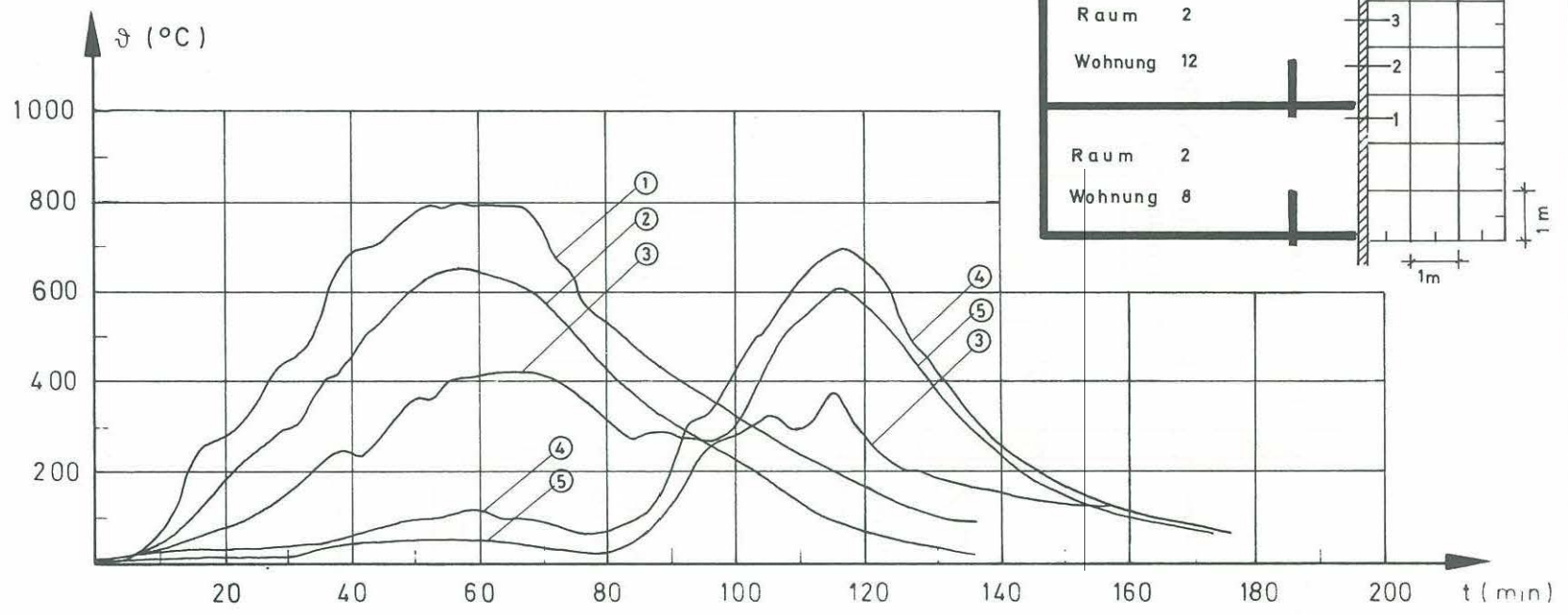
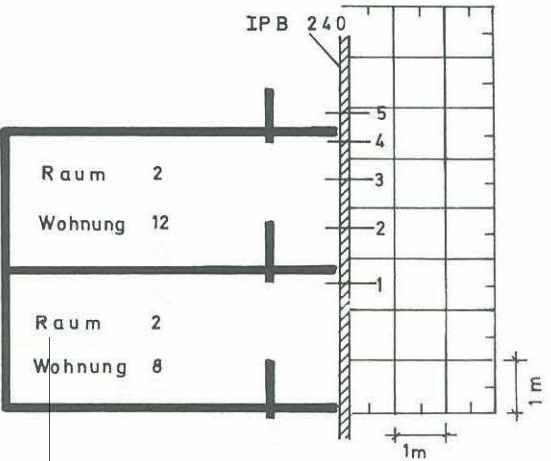


Temperaturen am I 140

Anlage zum Versuch
Nr. 1 8
Kap. 8.4

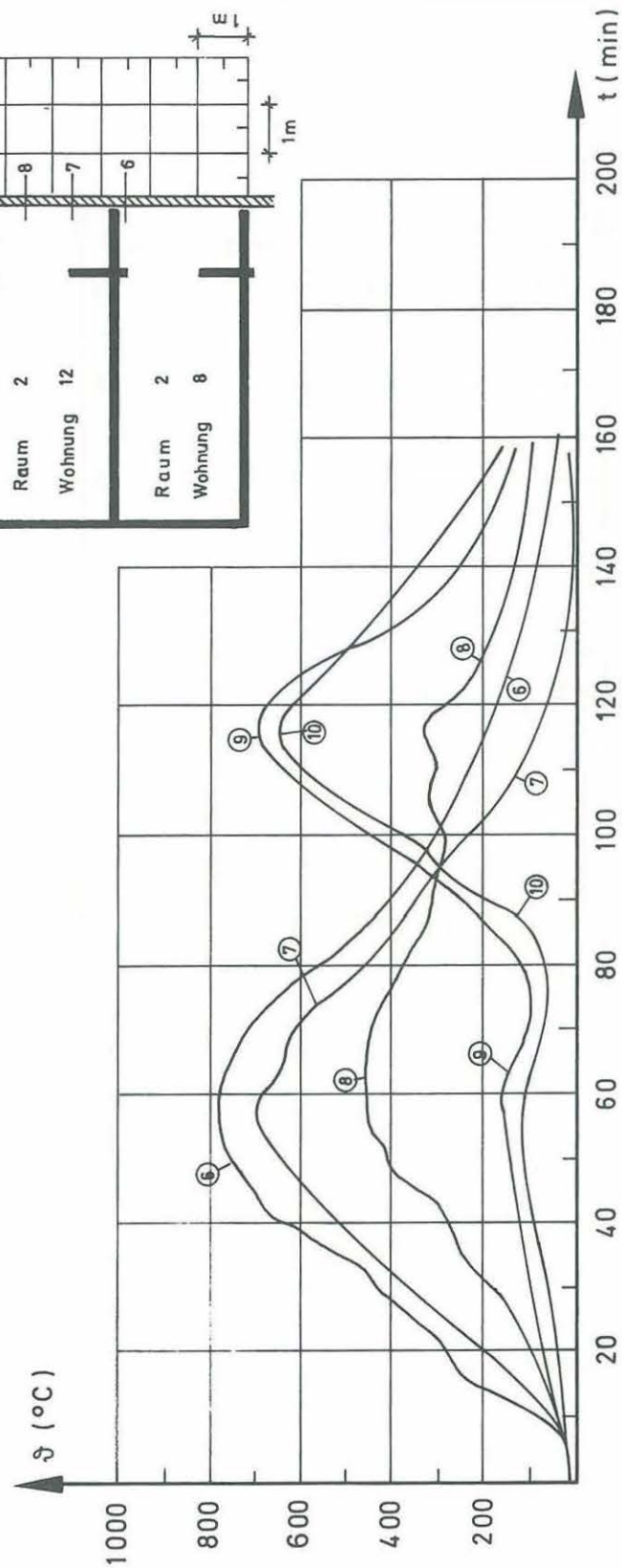


Maximaltemperaturen am I 140 (ϑ_{40} zum Zeitpunkt $t \approx 40'$
 ϑ_{60} zum Zeitpunkt $t \approx 60'$)

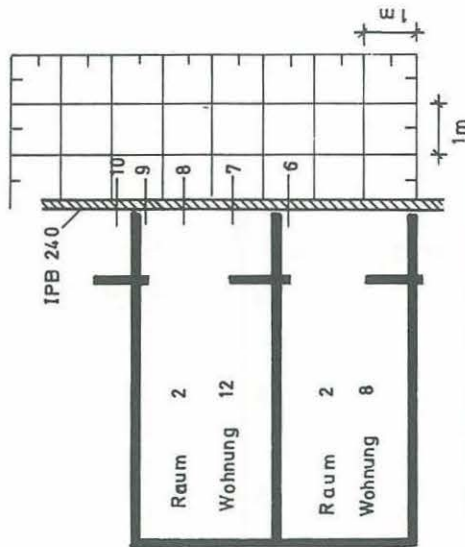


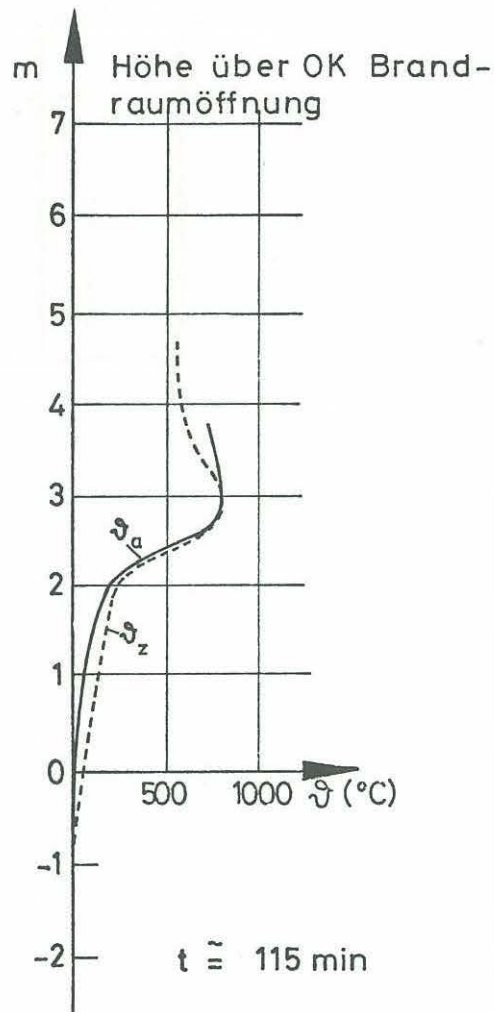
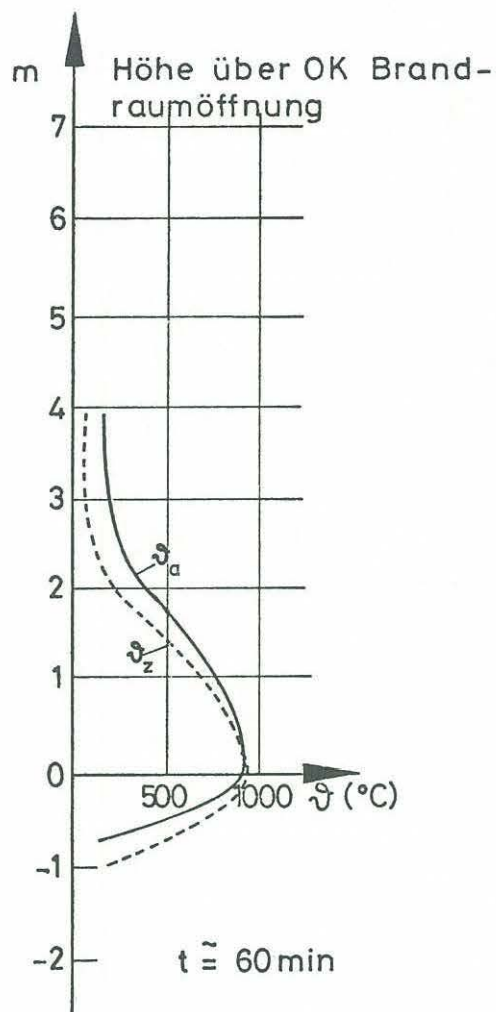
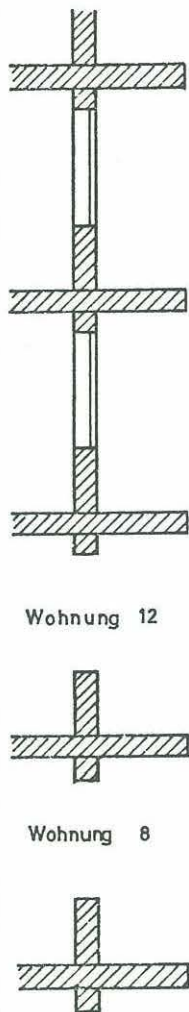
Temperaturen am IPB 240 (den Brandräumen zugekehrter Flansch)

Anlage zum Versuch
Kap. 8.4
Nr. 3



Temperaturen am IPB 240 (den Brandräumen abgekehrter Flansch)

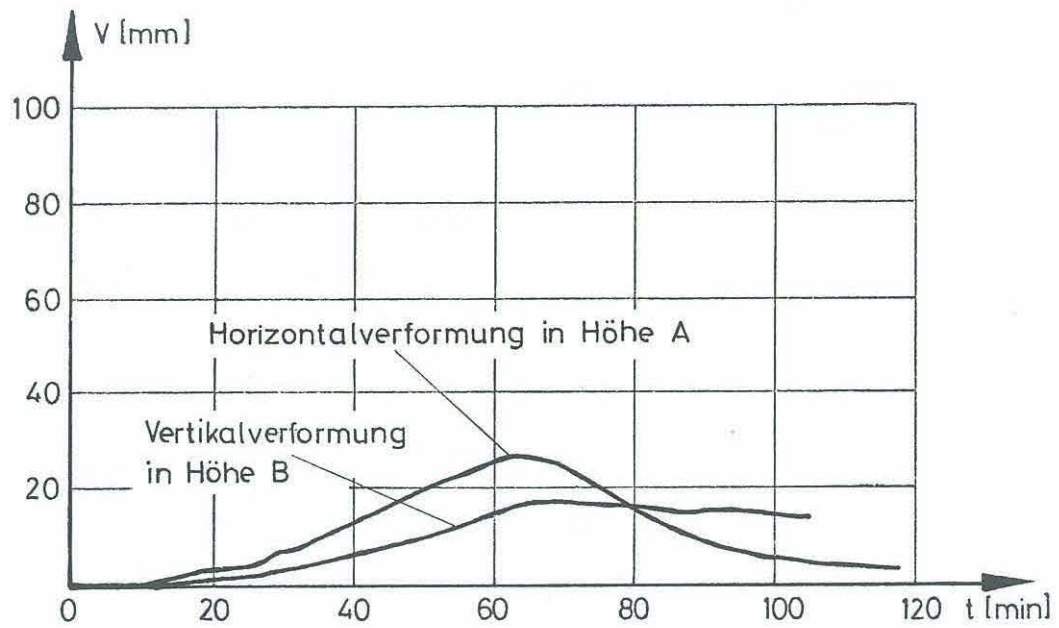




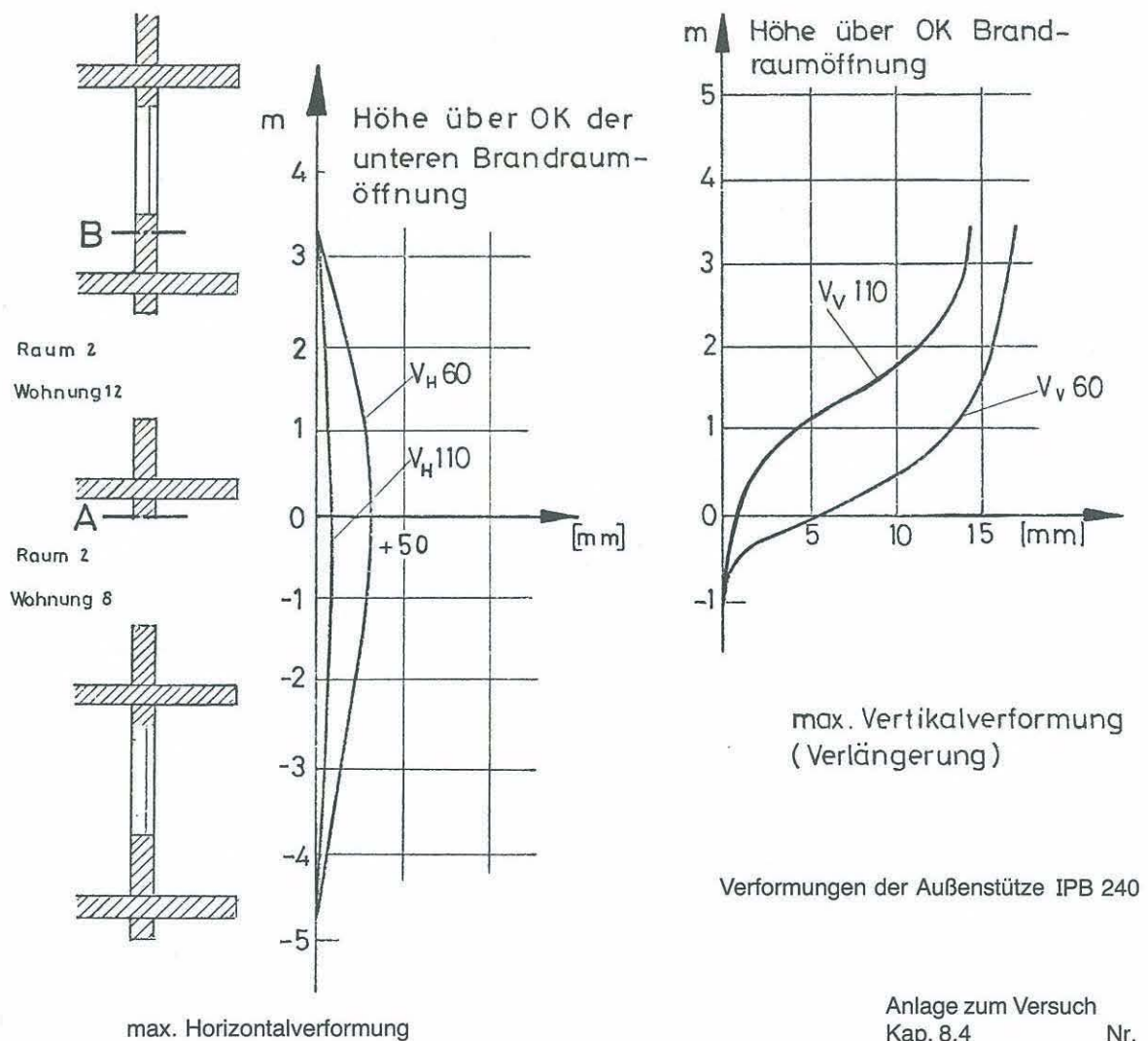
ϑ_z = Temperatur an dem den Brandräumen zugekehrten Flansch
 ϑ_a = Temperatur an dem den Brandräumen abgekehrten Flansch

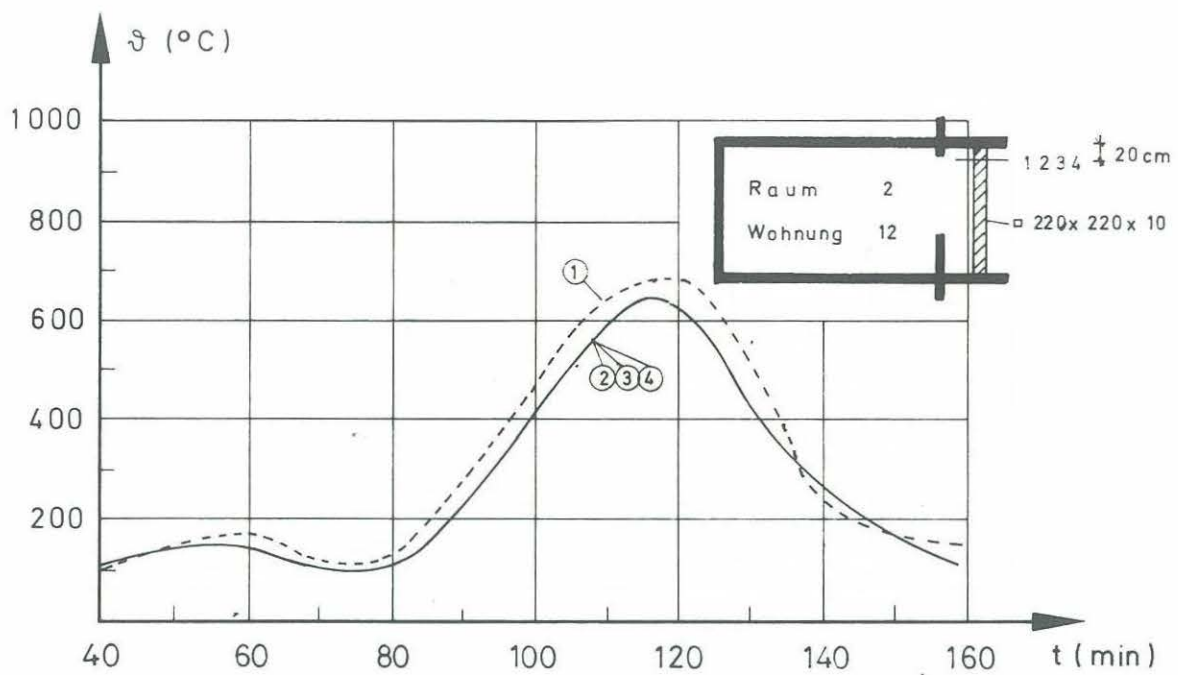
Maximaltemperaturen am IPB 240

Anlage zum Versuch 8
 Kap. 8.4 Nr. 5

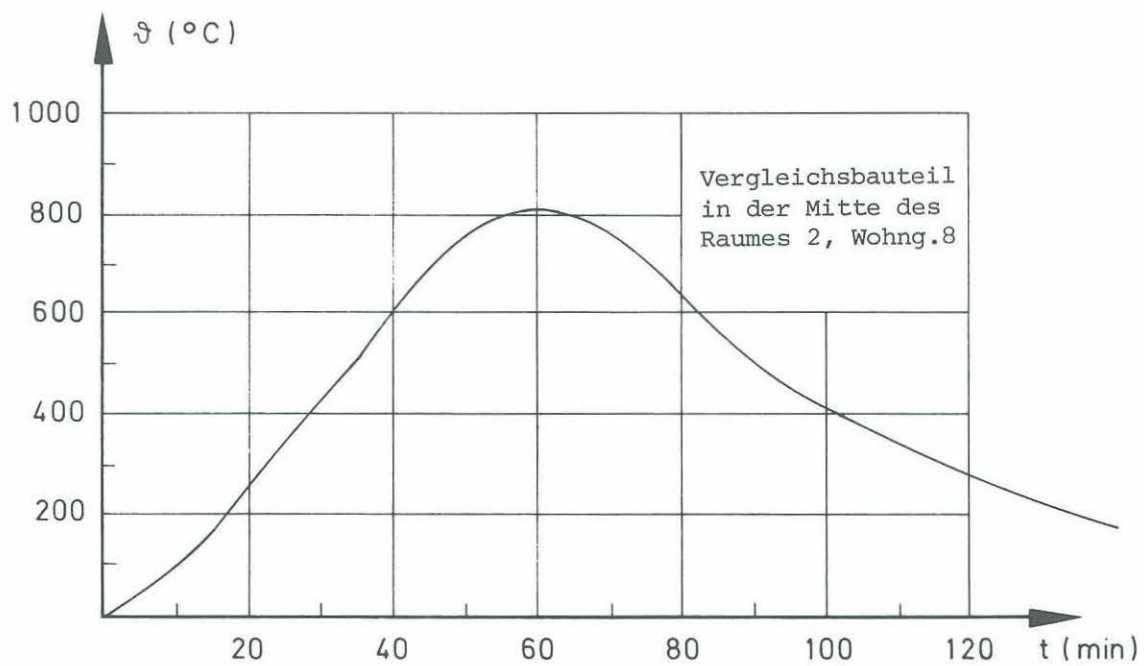


Zeitlicher Verlauf der Verformungen

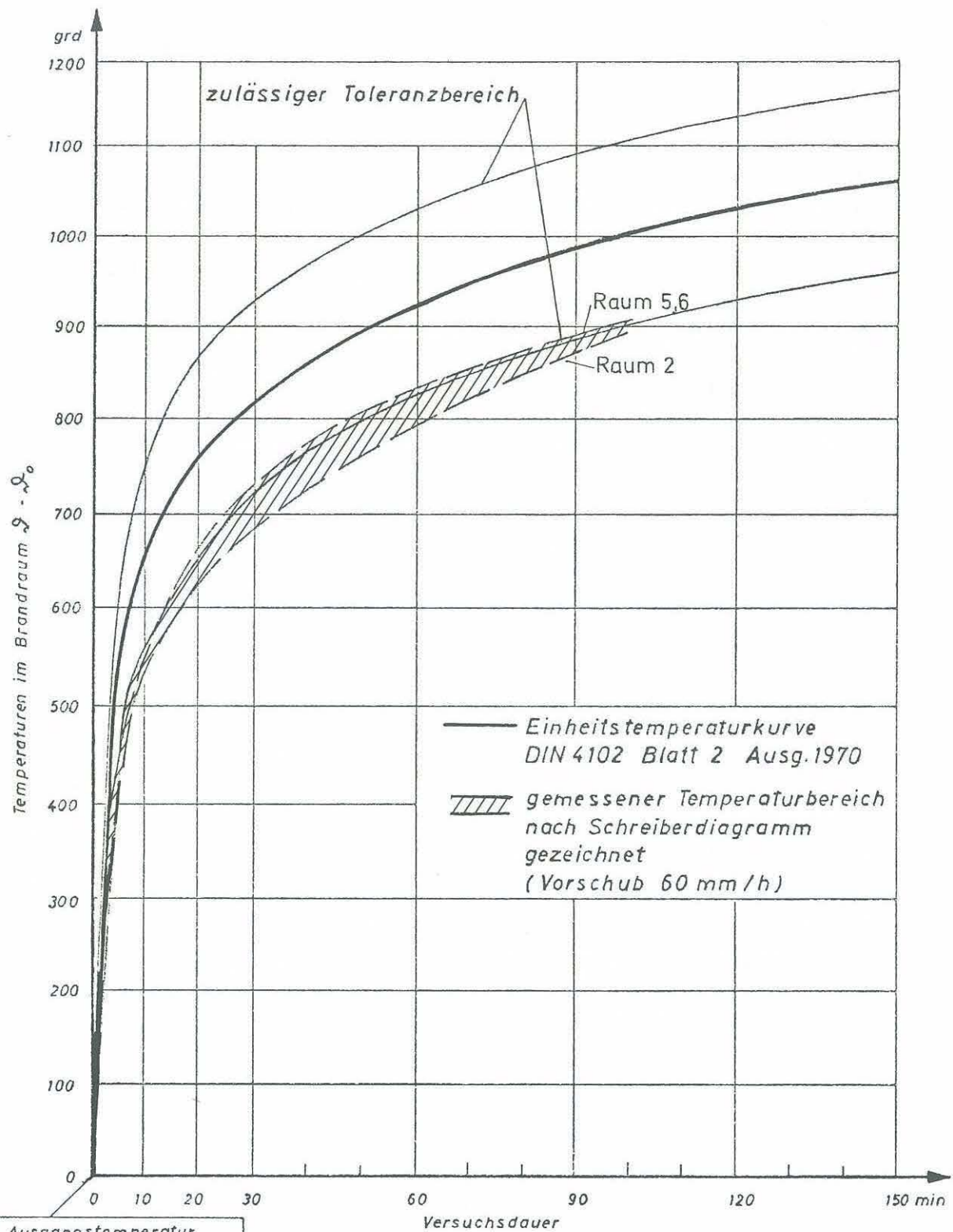




Temperaturverlauf 20 cm unter dem Stützenkopf des Quadratrohres 220 x 220 x 10 cm

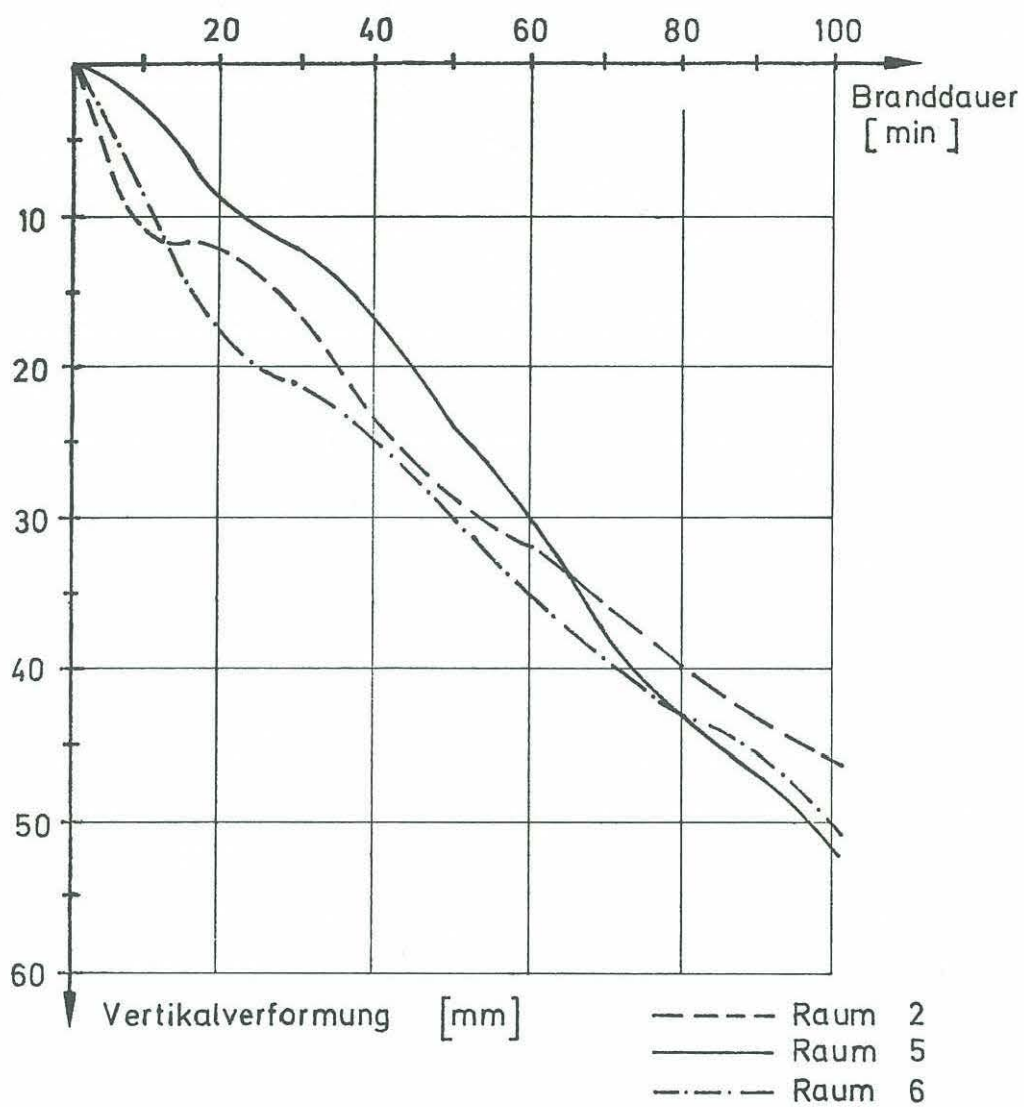


Temperaturverlauf am Vergleichsbauteil IPB 240 (l = 1 m) in Brandraummitte (Raum 2, Wohnung 8)



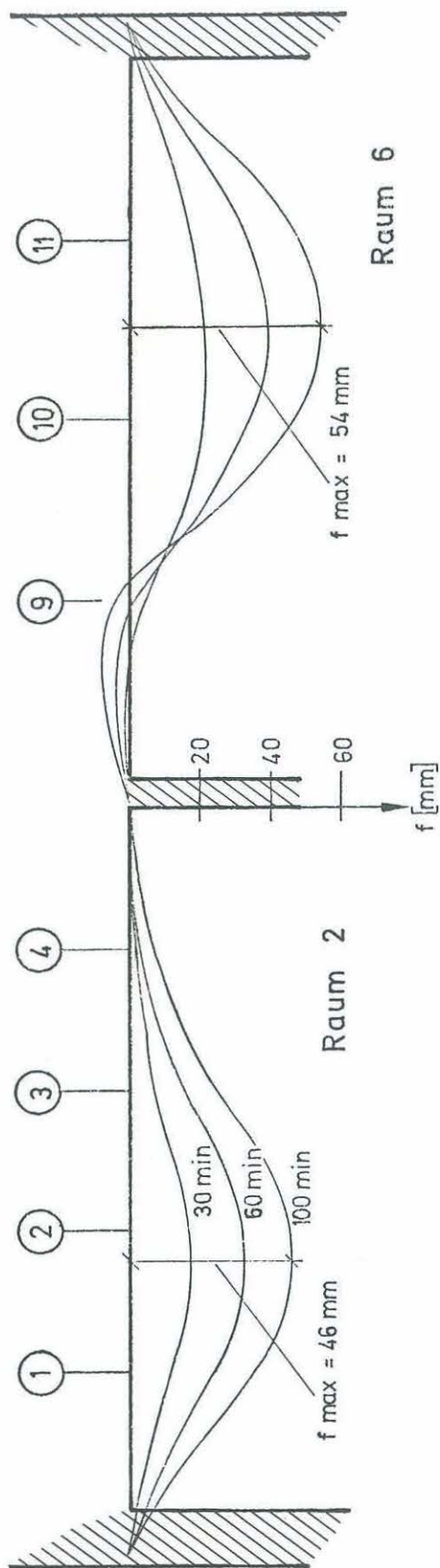
Brandraumtemperaturen Wohnung 1

Anlage zum Versuch 9
Kap. 7.1 Nr. 1



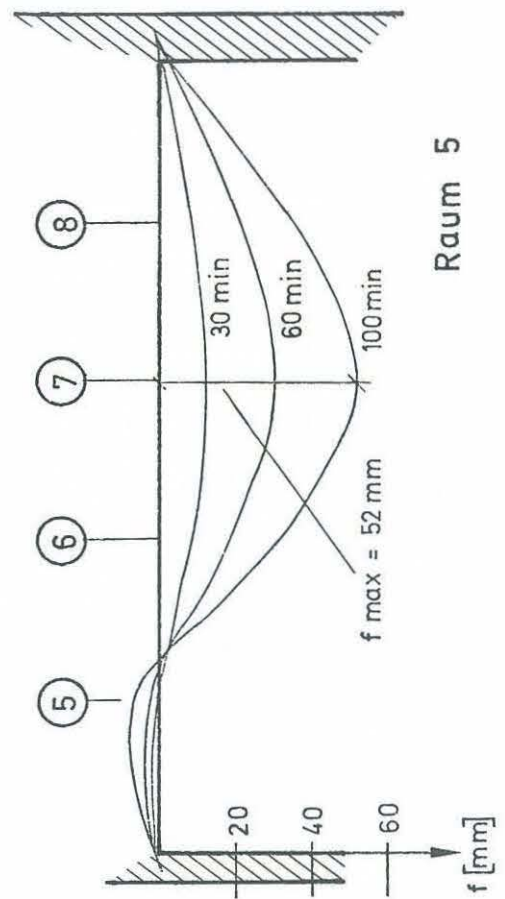
Maximalverformungen Decke über Wohnung 1

Anlage zum Versuch 9
Kap. 7.1 Nr. 2



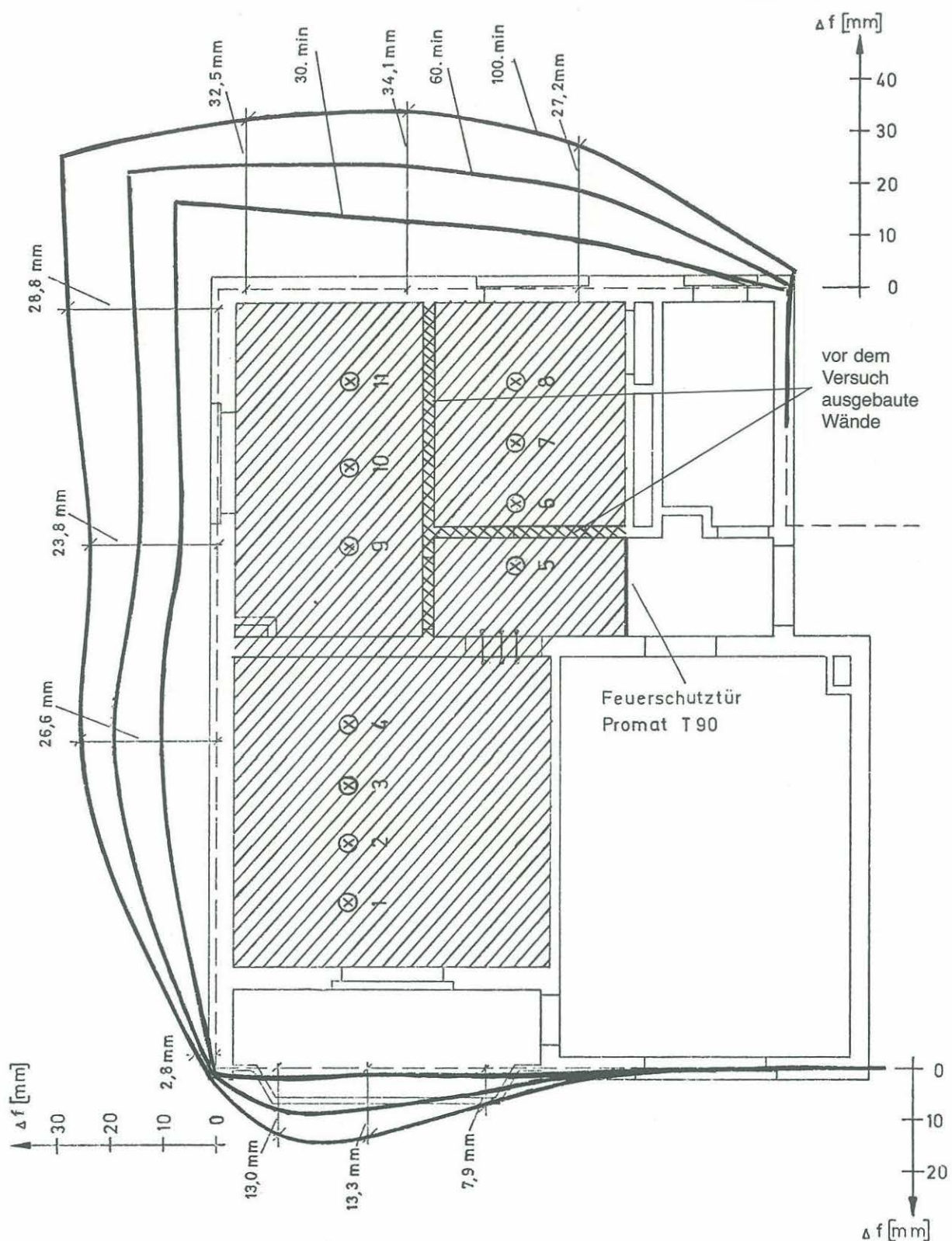
Raum 2

Raum 6



Raum 5

Biegelinien Decke über Wohnung 1



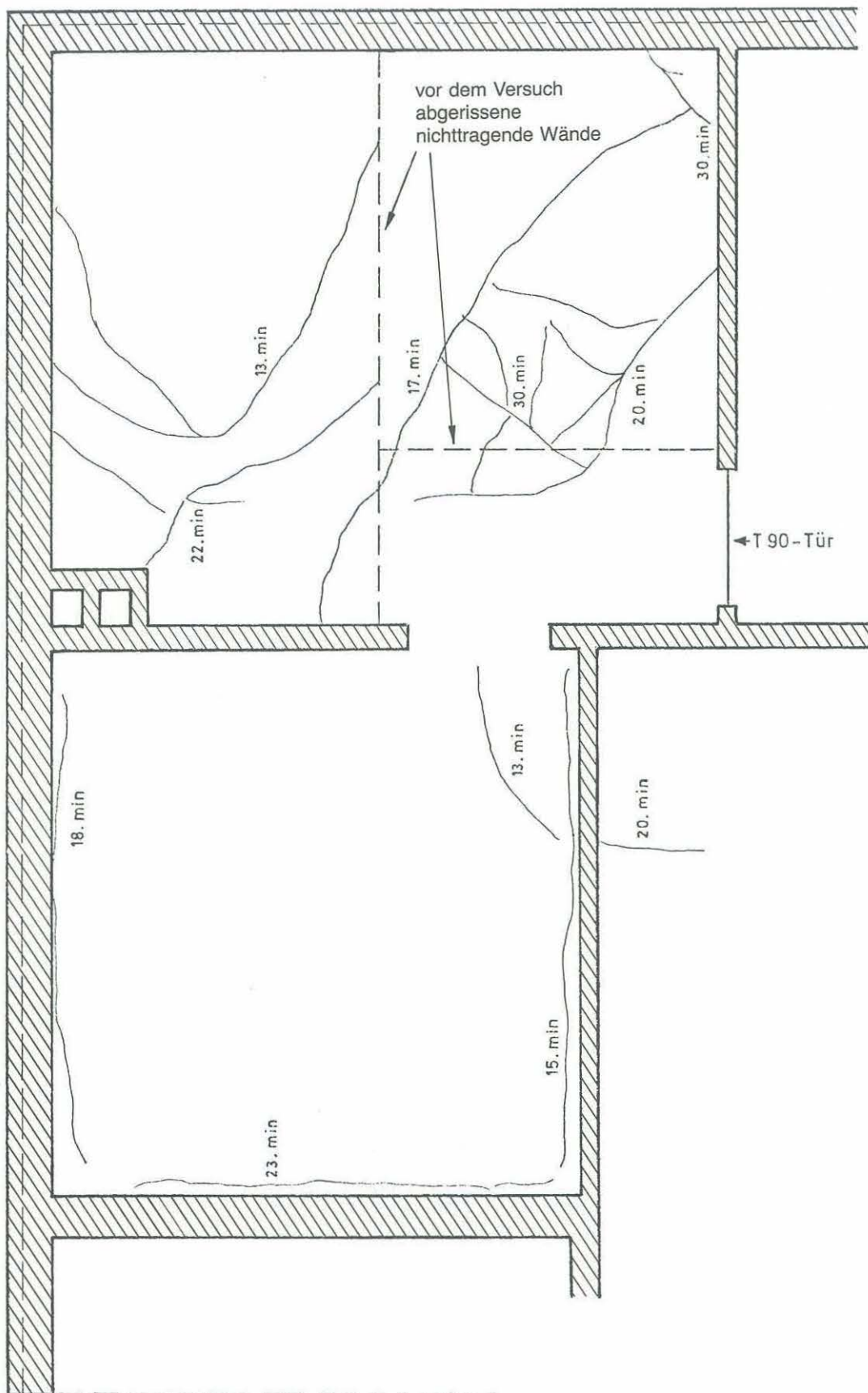
⊗ Verformungsmeßstellen

— Dehnungsmeßstellen

/// Beflammte Deckenfläche

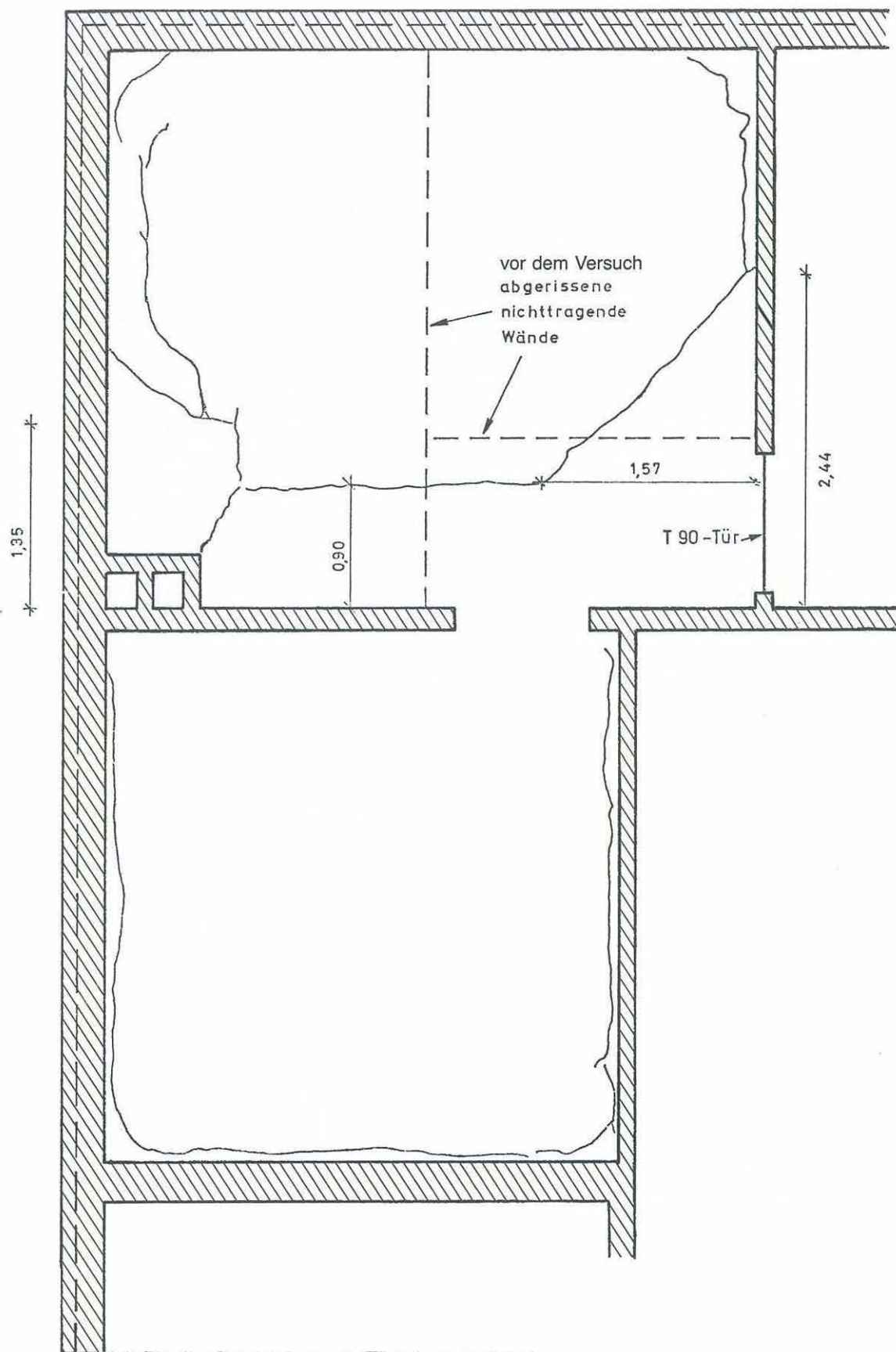
Horizontalverschiebungen Decke über Wohnung 1

Anlage zum Versuch 9
Kap. 7.1 Nr. 4



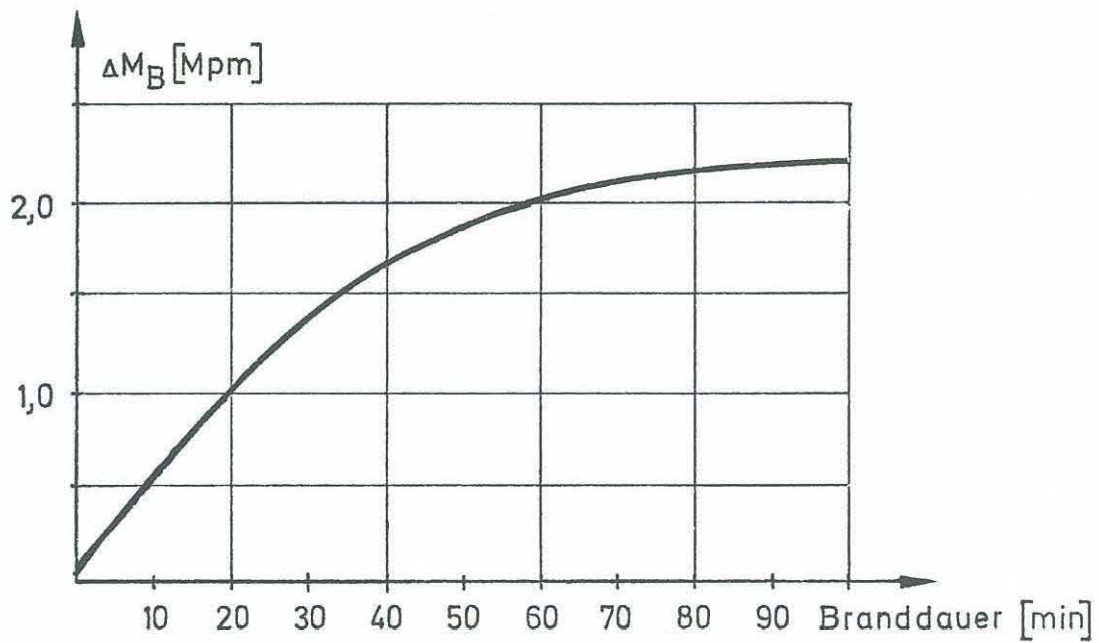
Zeitliche Rißentwicklung Decke über Wohnung 1

Anlage zum Versuch 9
Kap. 7.1 Nr. 5

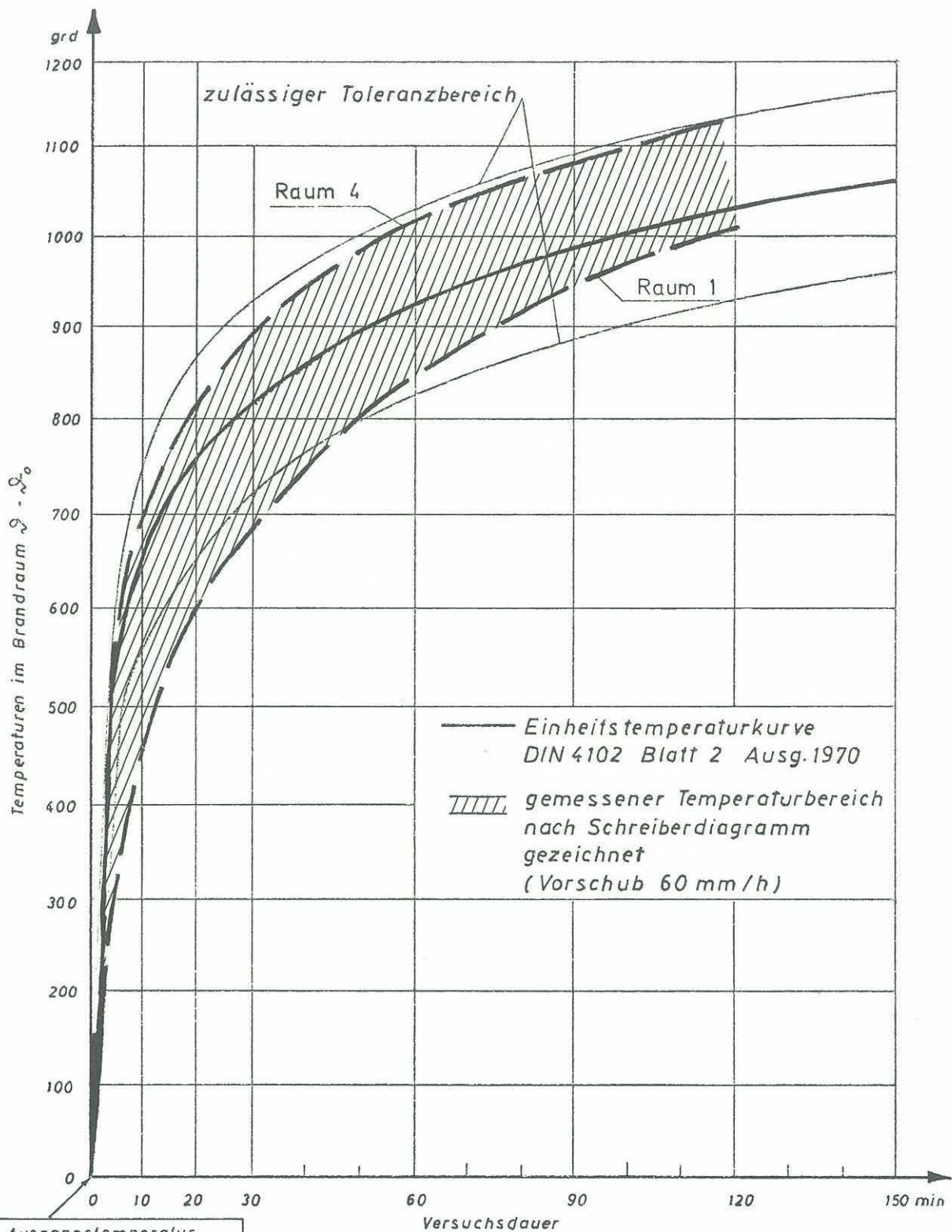


Rißbild nach dem Brandversuch (Haupttrisse)

Anlage zum Versuch 9
Kap. 7.1 Nr. 6

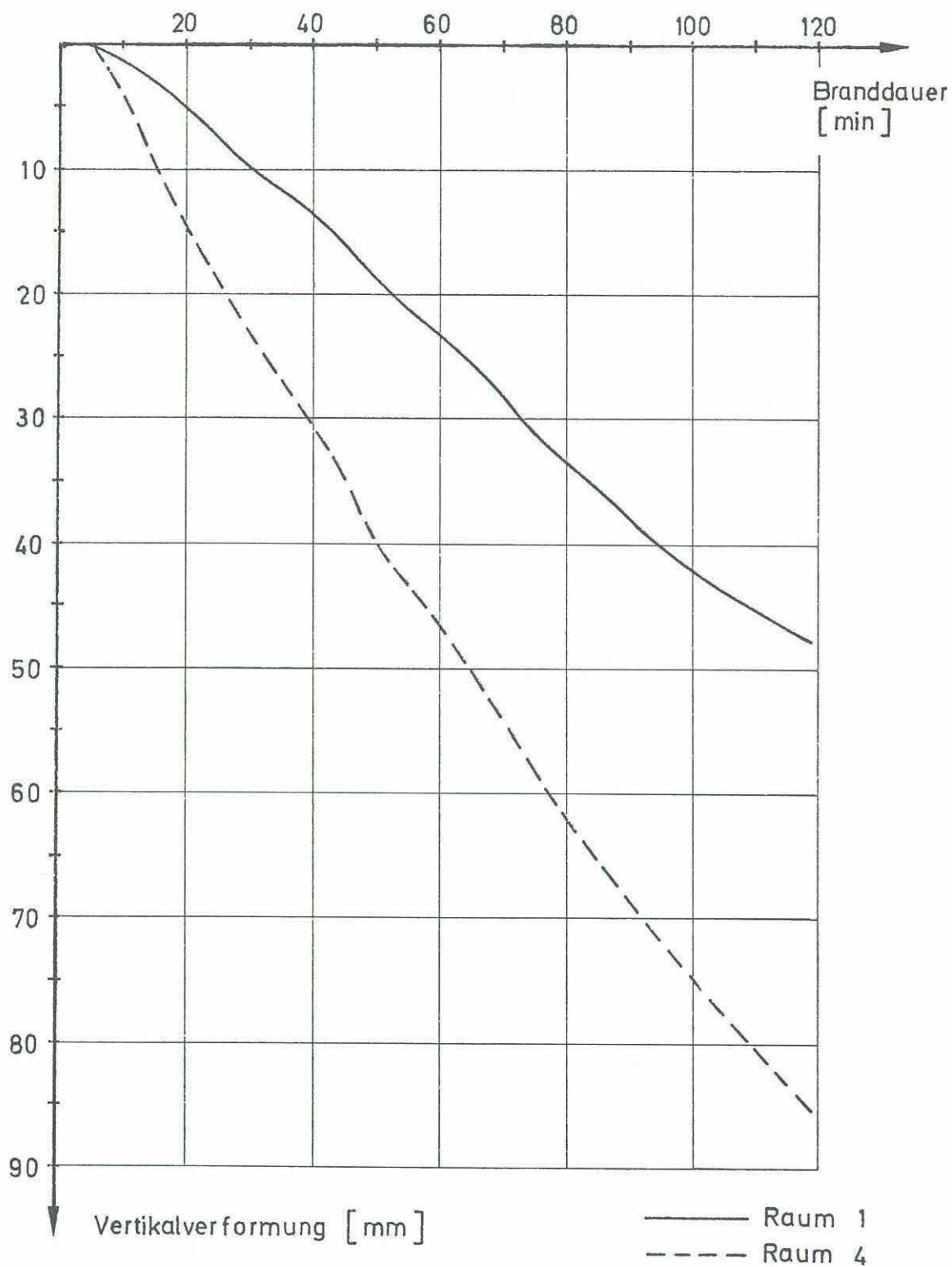


Änderung des Stützmomentes: Decke über Wohnung 1 zwischen Raum 2 und 3



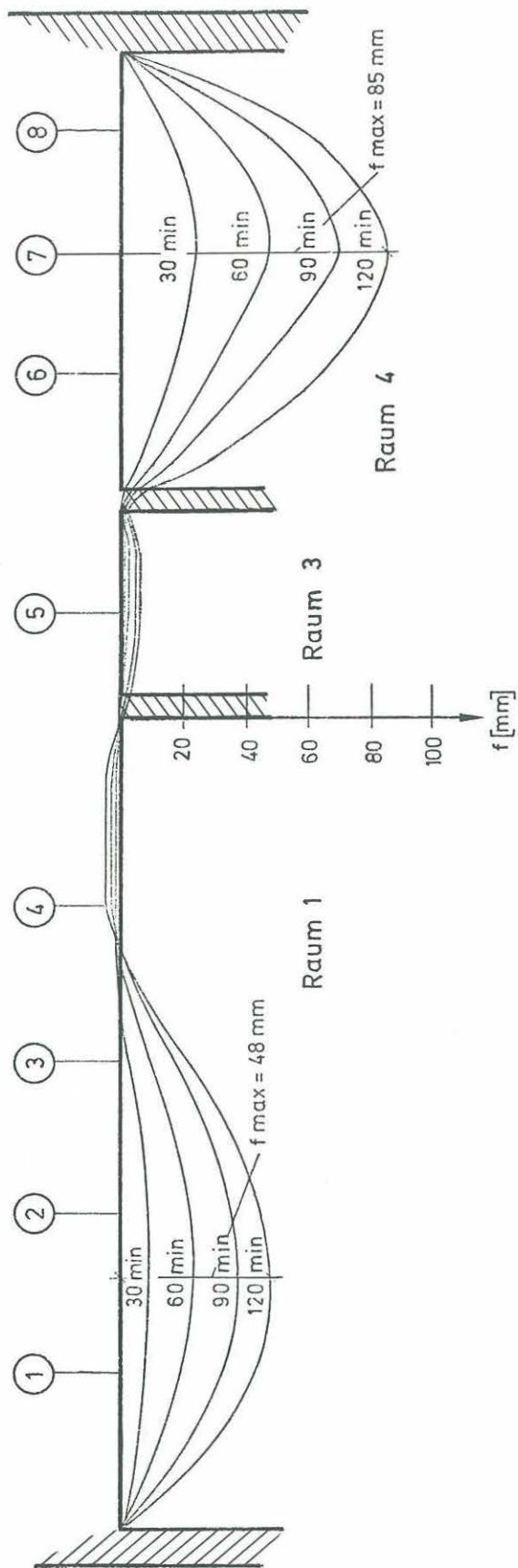
Brandraumtemperaturen Wohnung 4

Anlage zum Versuch 10
Kap. 7.1 Nr. 1



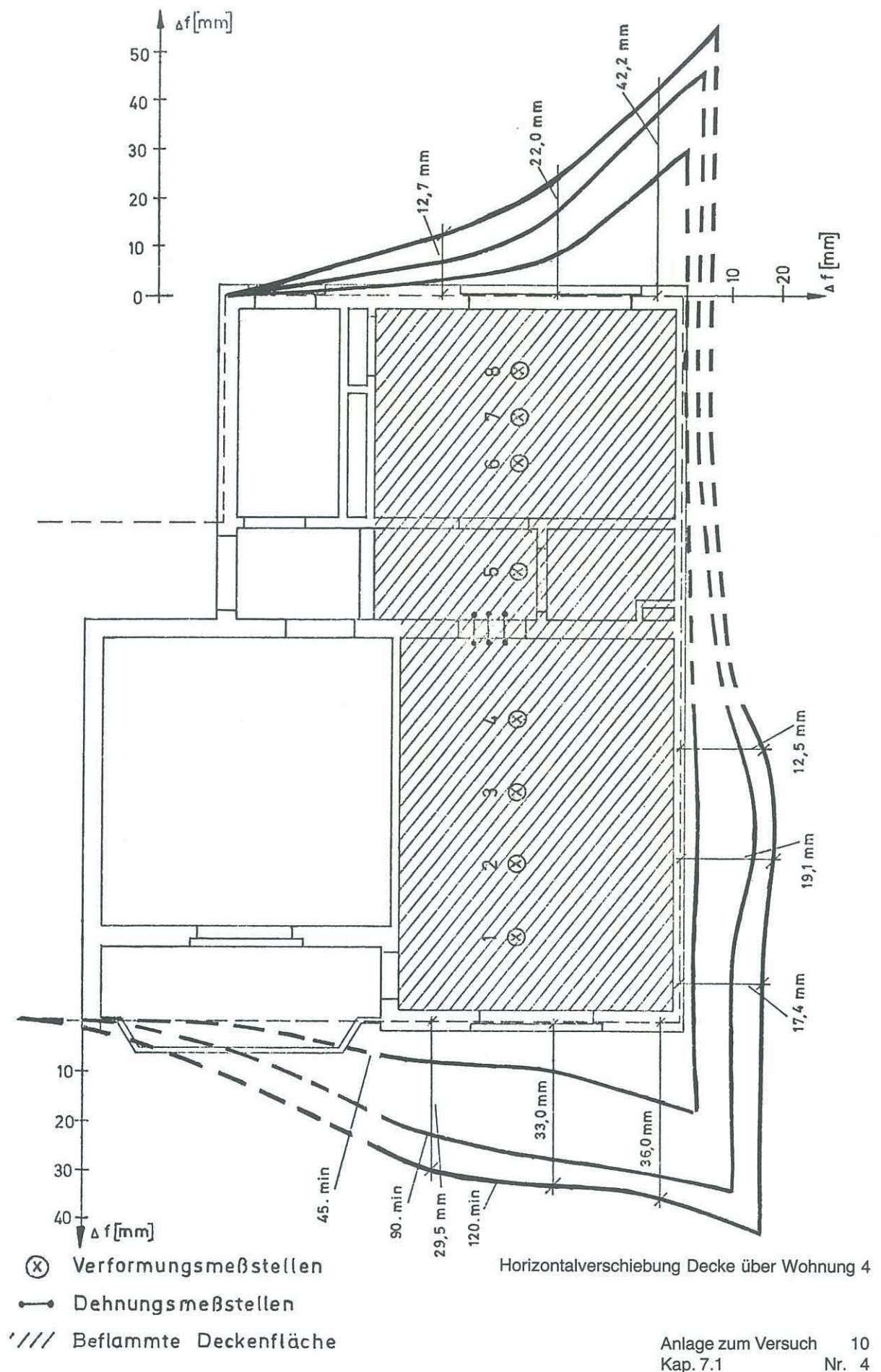
Maximalverformungen Decke über Wohnung 4

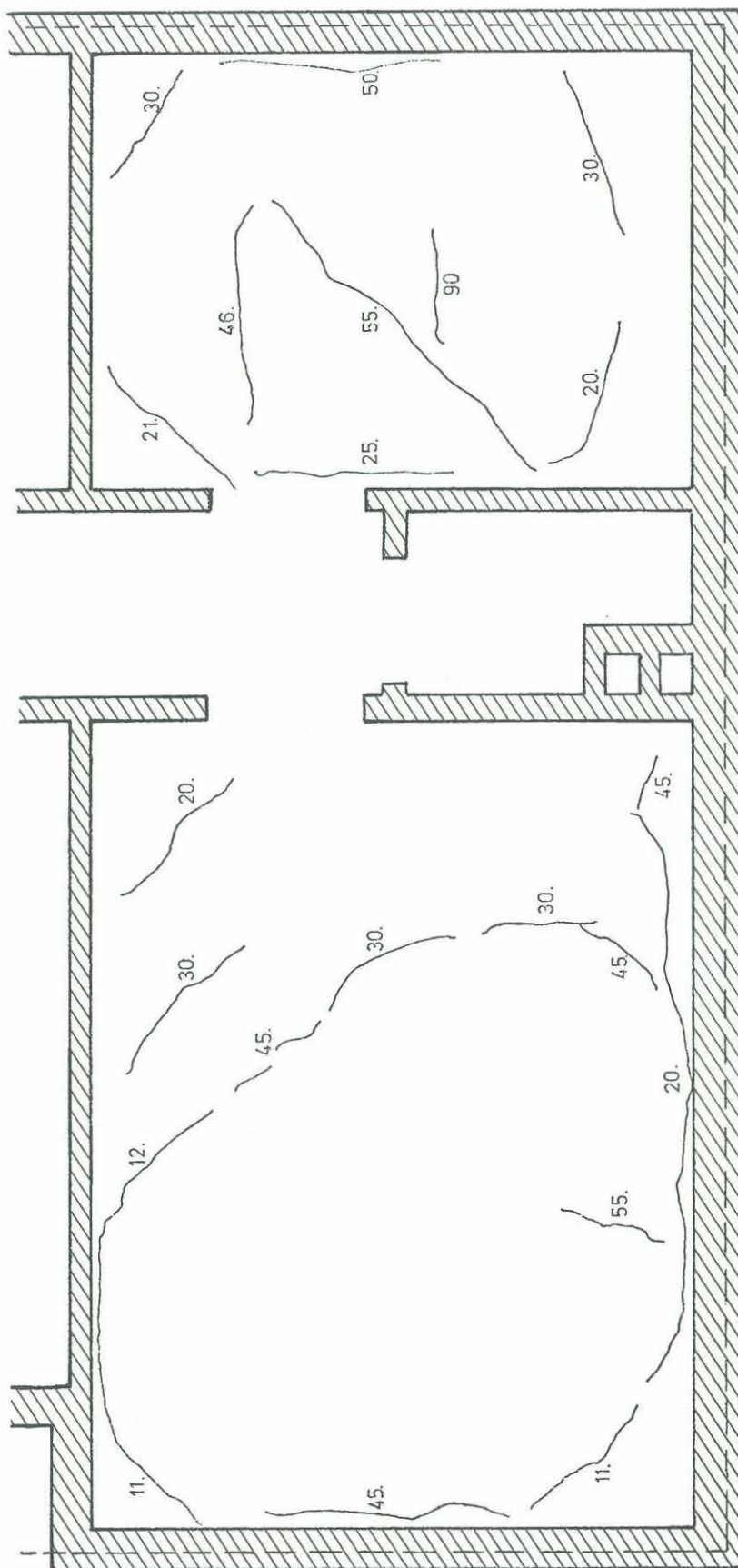
Anlage zum Versuch 10
Kap. 7.1 Nr. 2



Biegelinie Decke über Wohnung 4

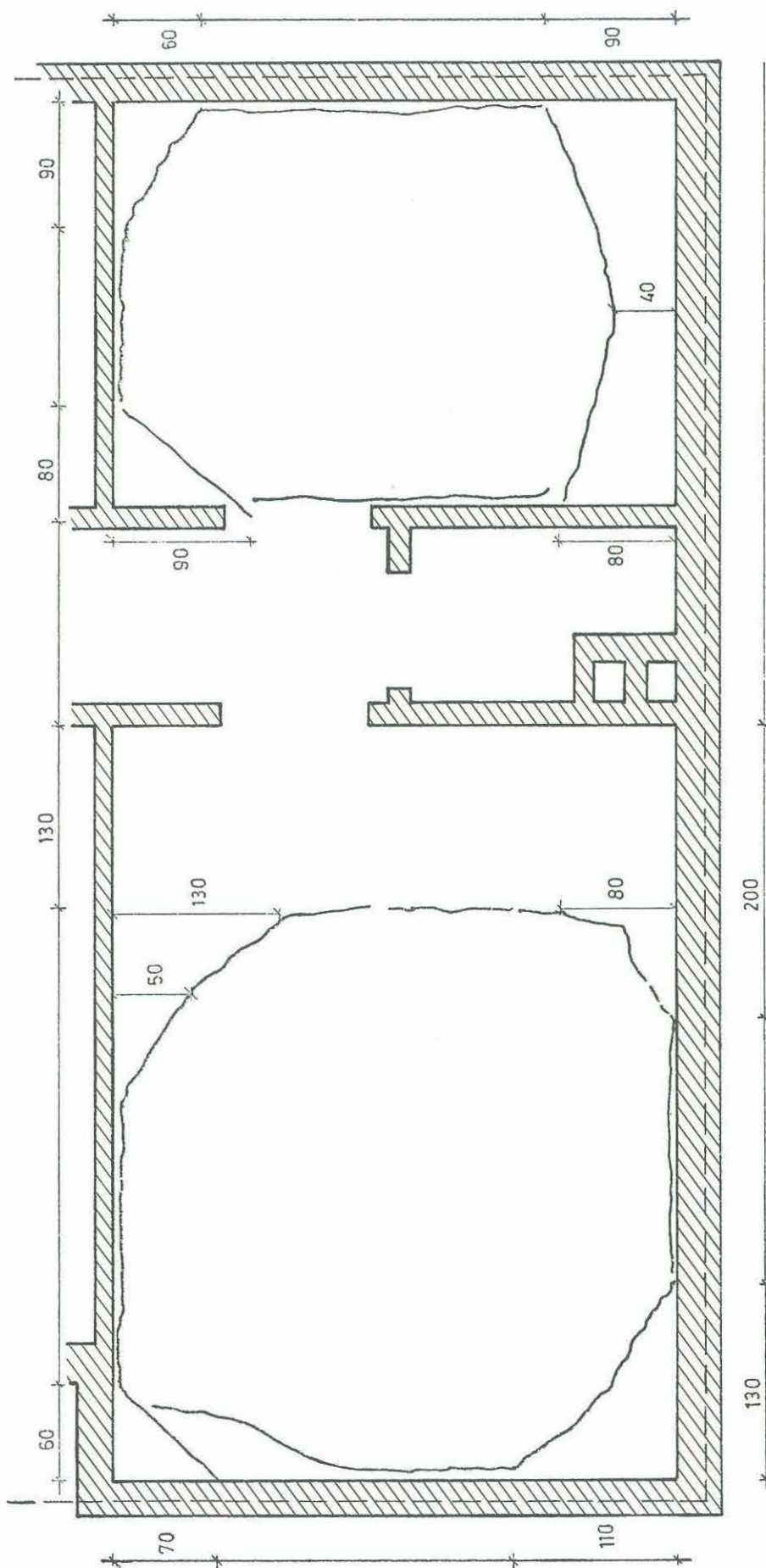
Anlage zum Versuch 10
Kap. 7.1 Nr. 3





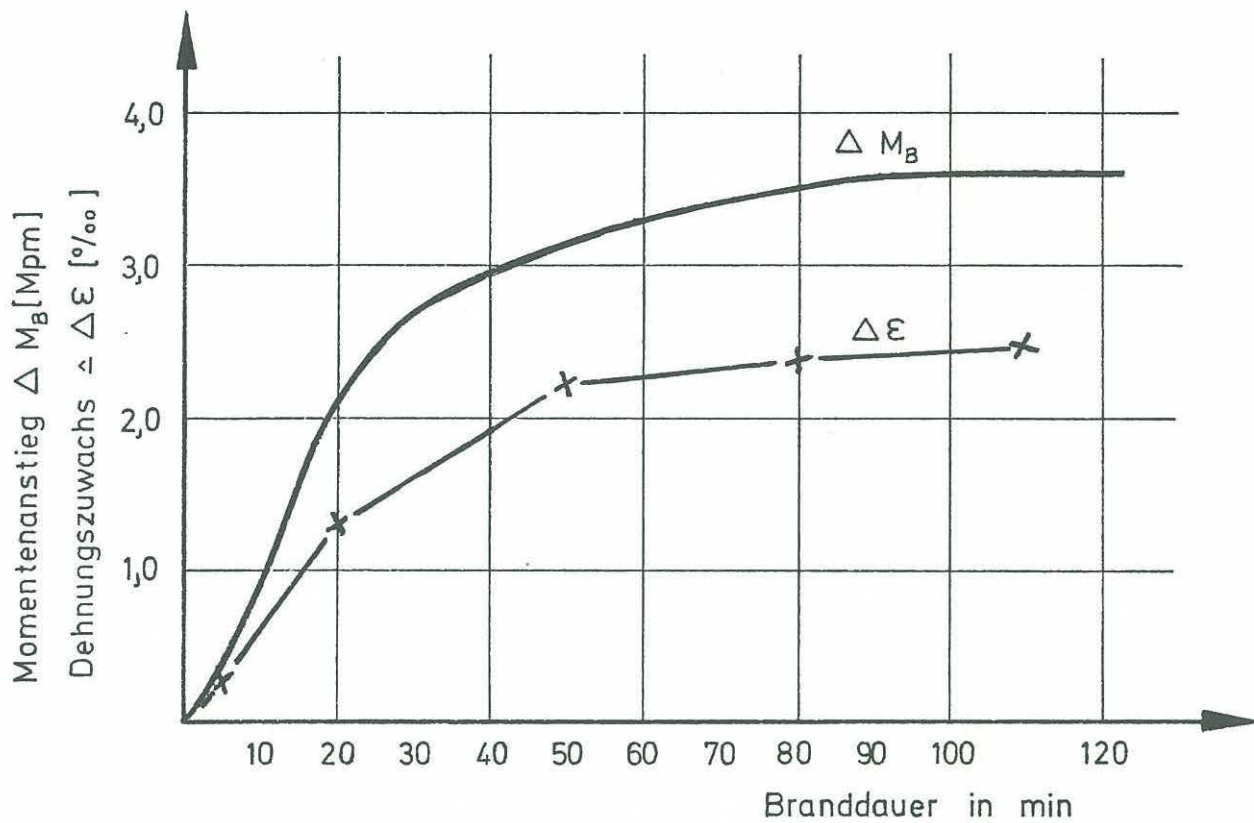
Zeitliche Rißentwicklung Decke über Wohnung 4

Anlage zum Versuch 10
Kap. 7.1 Nr. 5

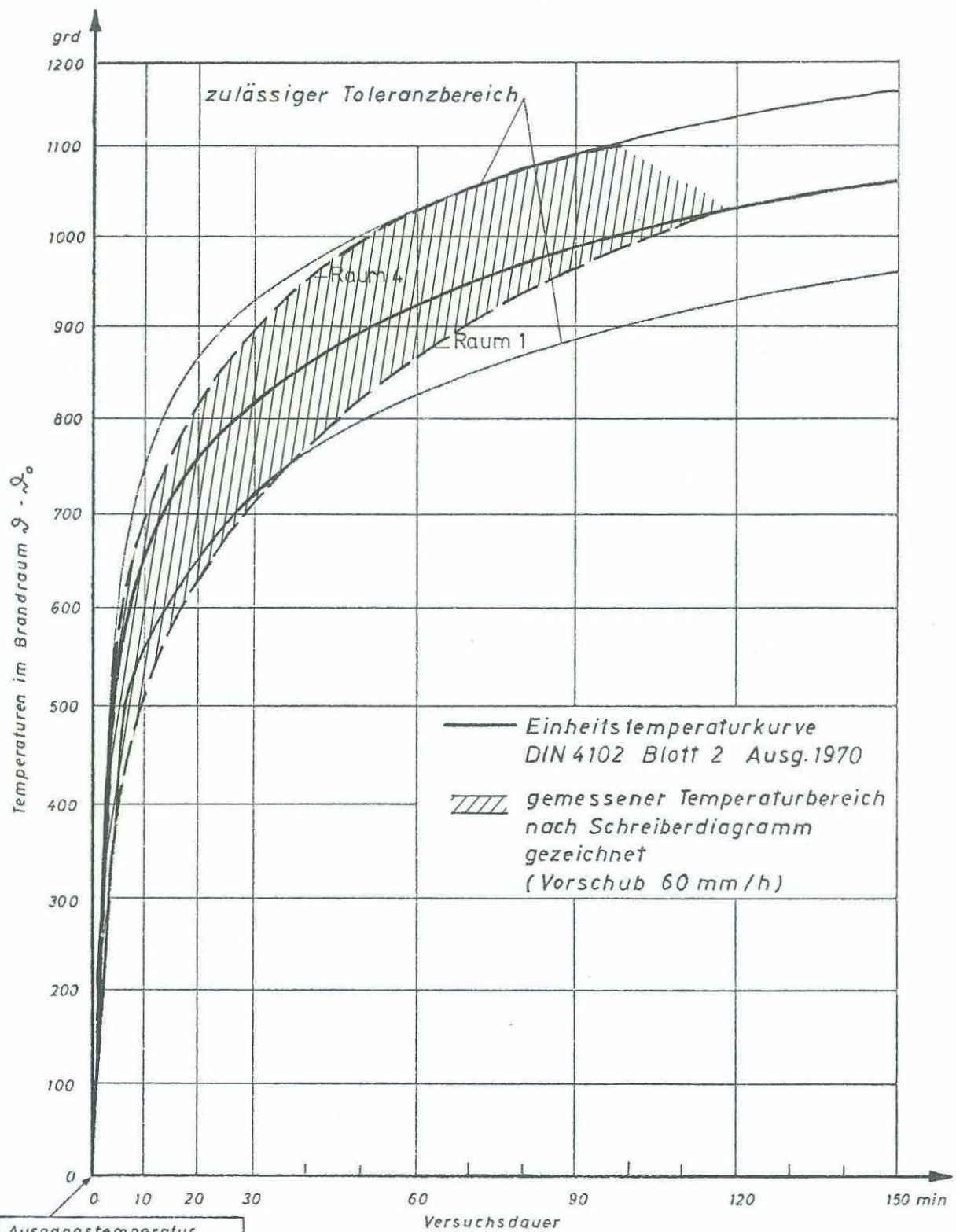


Rißbild nach dem Brandversuch (Haupttrisse)

Anlage zum Versuch 10
Kap. 7.1 Nr. 6

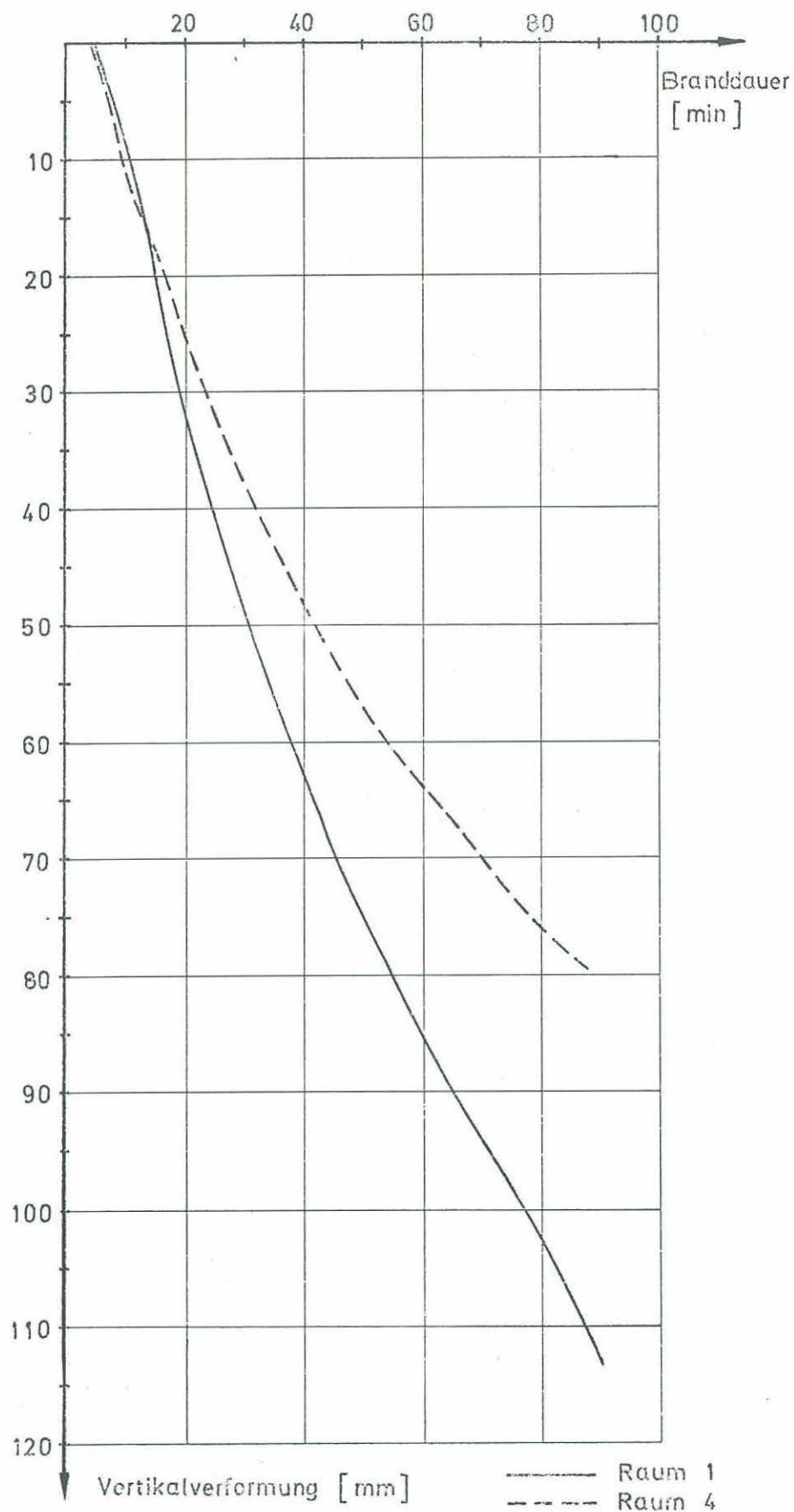


Änderung des Stützmomentes: Decke über Wohnung 4 zwischen Raum 1 und 3
und Dehnungszuwachs der oberliegenden Bewehrung



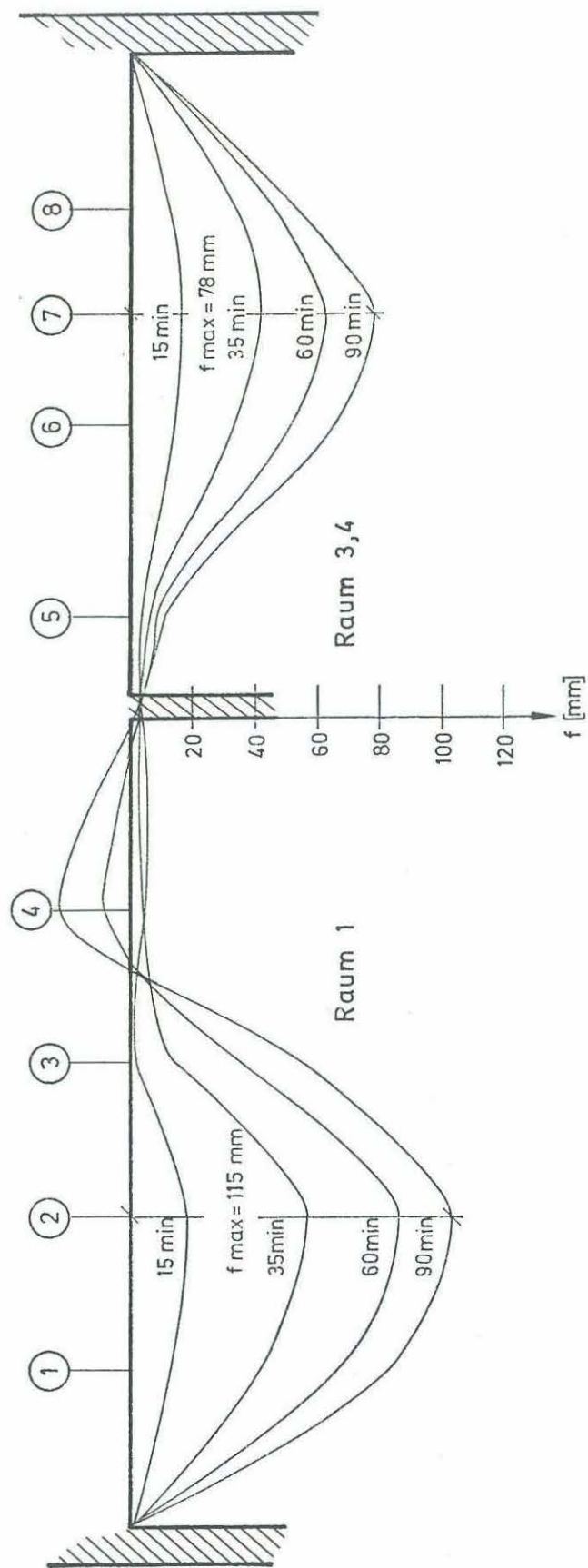
Brandraumtemperaturen Wohnung 6

Anlage zum Versuch 11
Kap. 7.1 Nr. 1

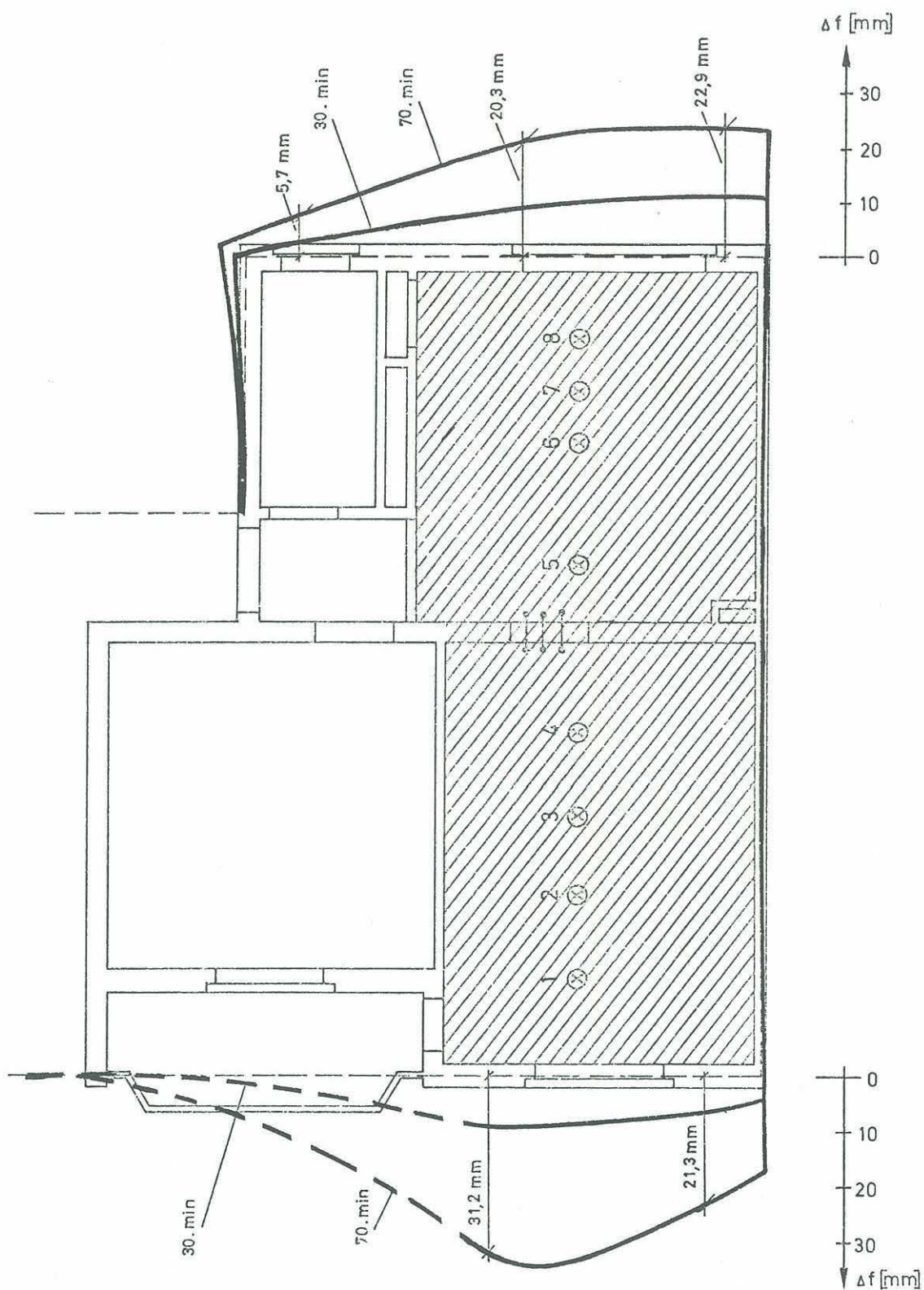


Maximalverformungen Decke über Wohnung 6

Anlage zum Versuch 11
Kap. 7.1 Nr. 2



Biegelinie Decke über Wohnung 6



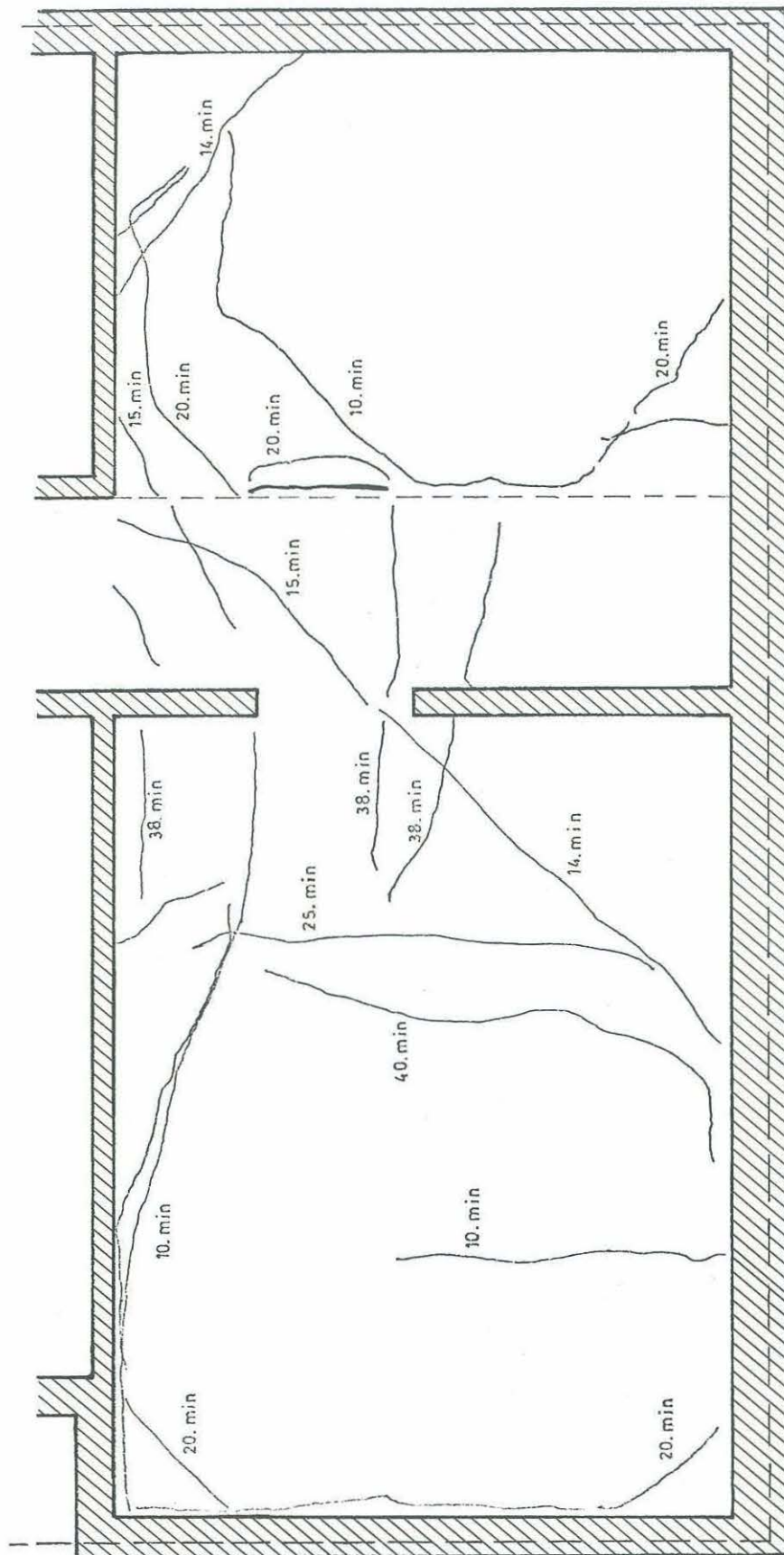
⊗ Verformungsmeßstellen

— Dehnungsmeßstellen

///, Beflamte Deckenfläche

Horizontalverschiebung Decke über Wohnung 6

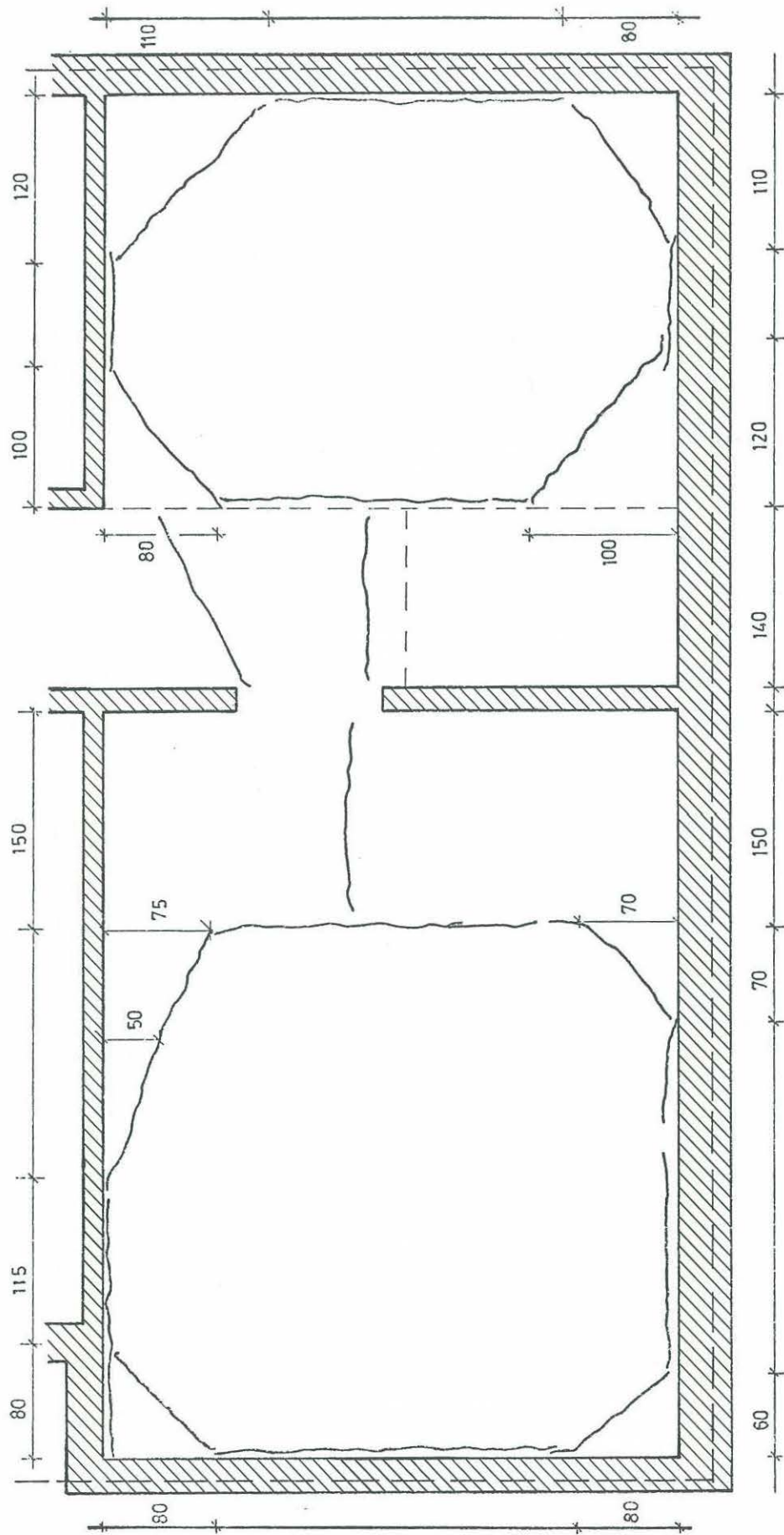
Anlage zum Versuch 11
Kap. 7.1 Nr. 4



Zeitliche Rißentwicklung Decke über Wohnung 6

Anlage zum Versuch
Kap. 7.1

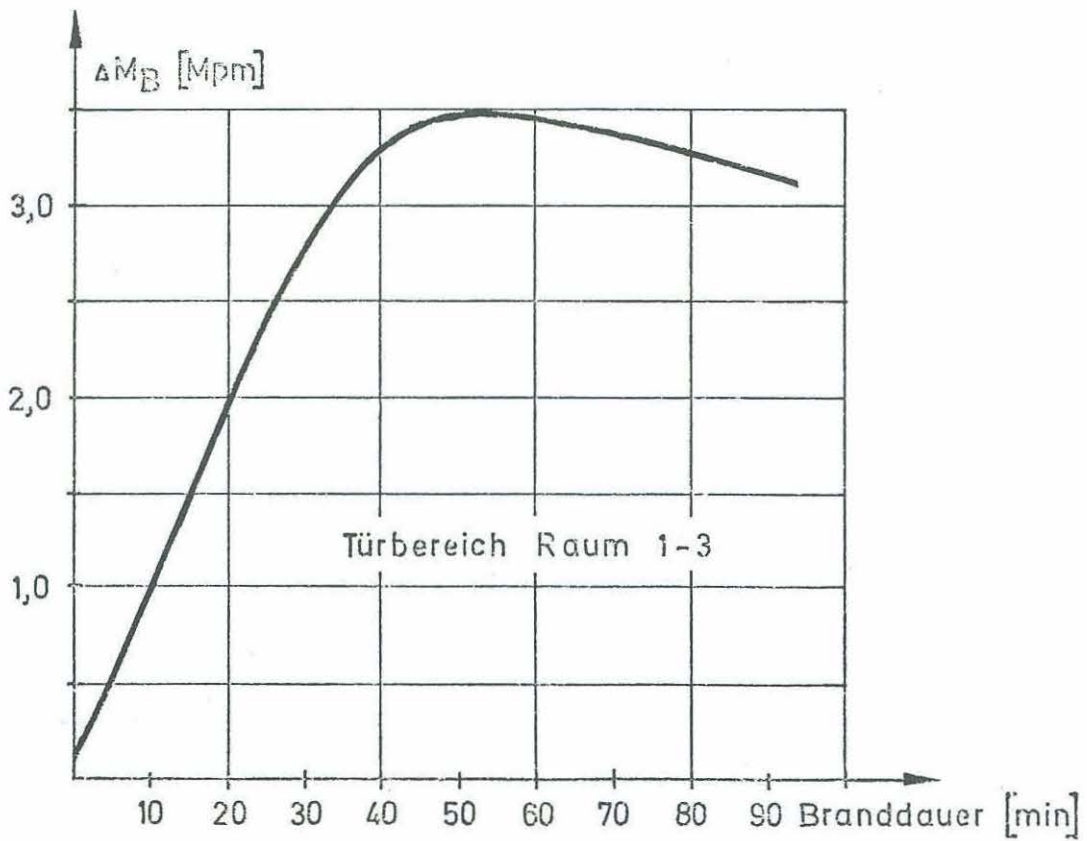
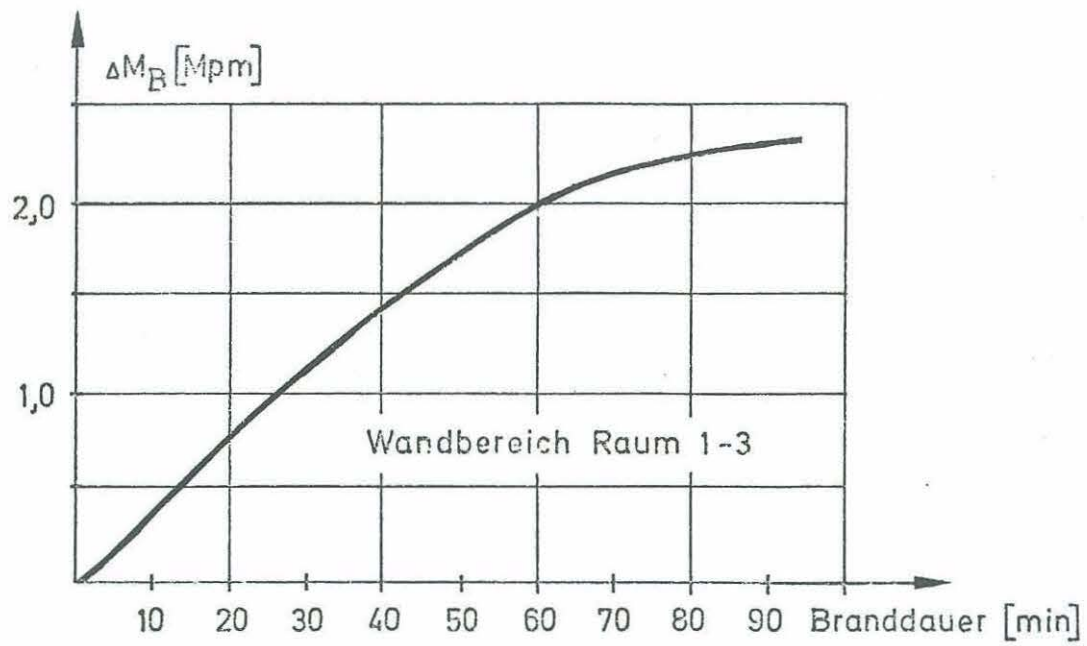
11
Nr. 5



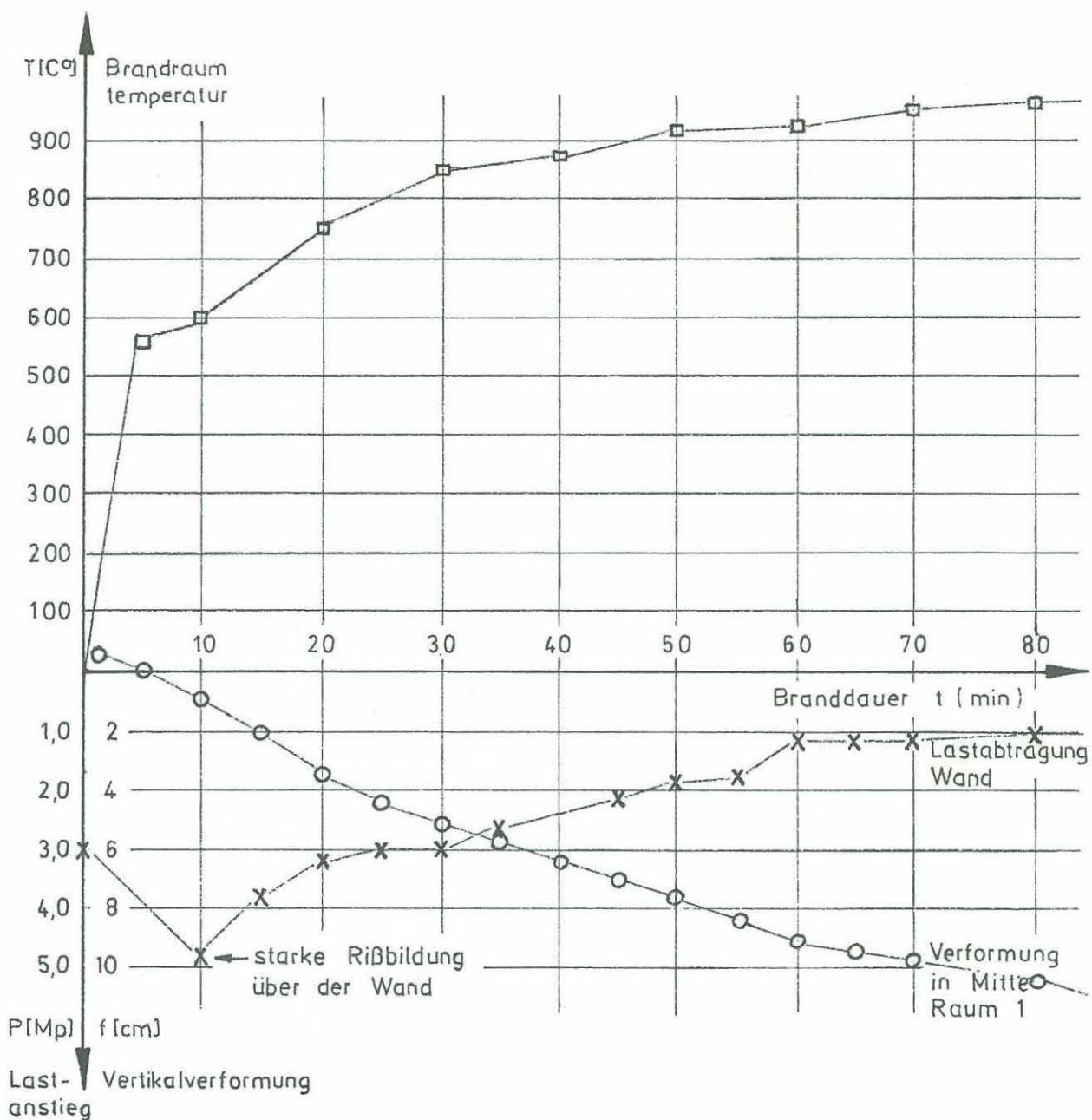
Rißbild nach dem Brandversuch (Haupttrisse)

Anlage zum Versuch
Kap. 7.1

11
Nr. 6



Änderung der Stützmomente der Decke über Wohnung 6 zwischen Raum 1 und 3



Lastabtragung auf 11,5 cm Wand zwischen Raum 1 und 2 und Brandraumtemperatur in Wohnung 6, Raum 1

Anlage zum Versuch 11
Kap. 7.2 Nr. 1

In der **Schriftenreihe 04 „Bau- und Wohnforschung“** des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau sind bisher folgende Hefte erschienen:

- | | |
|-----------------------------|---|
| Heft Nr. 001
1973 | Kunststoffhaus fg 2000.
Eine Arbeit zur Entwicklung von Bauelementen für ein Bausystem aus Kunststoffen
– vergriffen – |
| Heft Nr. 002
1973 | Kriterien zur Optimierung von Querwandgefügen
– vergriffen – |
| Heft Nr. 003
1973 | Nutzwertanhebung durch technischen Ausbau.
Stufe 1: Künftige Anforderungen an den Nutzwert von Wohnungen
(Soziologische Voruntersuchung)
– vergriffen – |
| Heft Nr. 004
1974 | Rationalisierungskatalog und Checklisten
– vergriffen – |
| Heft Nr. 005
1974 | Systeme der Gebäudeerschließung im Geschößwohnungsbau.
Dokumentation einer Kostenanalyse im sozialen Wohnungsbau
– vergriffen – |
| Heft Nr. 006
1974 | Optimaler Ablauf der Ausbauarbeiten.
Kriterien für den optimalen Ablauf der Ausbauarbeiten
im Hoch- und Wohnungsbau
– vergriffen – |
| Heft Nr. 007
1974 | Wohnhügel Marl.
Bau- und wohnwirtschaftliche Untersuchungen
– vergriffen – |
| Heft Nr. 008
1974 | Vergleichende Untersuchung der wirtschaftlichen Ausführungsmöglichkeiten
der Kellergeschosse von Einfamilienhäusern aus vorgefertigten Teilen
– vergriffen – |
| Heft Nr. 009
1975 | Bericht 1: Kosten und Wirtschaftlichkeit von Terrassenhäusern
Bericht 2: Steigerung des Wohnwertes und ihre Auswirkung auf die Gebäudekosten
– vergriffen – |
| Heft Nr. 010
1975 | Verhalten von vorgefertigten Außenwänden und Außenwandverkleidungen
aus Holz und Holzwerkstoffen
unter den Einflüssen der Witterung und der Nutzung
– vergriffen – |
| Heft Nr. 011
1975 | Elektroinstallation in variablen Wohnungen.
Beobachtungen an den Bauten der Wettbewerbe „Flexible Wohngrundrisse“
und „Elementa 72“
– vergriffen – |
| Heft Nr. 012
1975 | Grundlagen für die Planung standardisierter Sanitärzellen
– vergriffen – |
| Heft Nr. 013
1975 | Nutzwertanhebung im Wohnungsbau.
Stufe 2: Technisches Idealprogramm
– vergriffen – |
| Heft Nr. 014
1976 | Verbesserung der Bauproduktinformation.
Anforderungen – Lösungsmöglichkeiten |
| Heft Nr. 015
1976 | Rationalisierung aus der Sicht der Baubeteiligten
– vergriffen – |
| Heft Nr. 016
1976 | Sanitär- und Heizungsinstallation
in Wohnungen mit veränderbaren Grundrissen
– vergriffen – |
| Heft Nr. 017
1976 | Die Wohnsituation der Körperbehinderten
in der Bundesrepublik Deutschland |

- Heft Nr. 018**
1976 Neue Technologien für die Baustellen der Zukunft.
Band I: Hochbau
- Heft Nr. 019**
1976 Querschnittsbericht: Ablauforganisation in der Bauwirtschaft
– vergriffen –
- Heft Nr. 020**
1976 Querschnittsbericht: Arbeitstechnik im Wohnungsbau.
Teilbericht: Schalarbeiten
– vergriffen –
- Heft Nr. 021**
1977 Rationalisierungskatalog · Orientierungsdaten · Nachweisliste · Checkliste
– vergriffen –
- Heft Nr. 022**
1977 Neue Technologien für die Baustellen der Zukunft.
Band II: Verkehrswegebau
- Heft Nr. 023**
1977 Die Verwendung des Standardleistungsbuchs bei der Leistungsbeschreibung mit
Leistungsprogramm
– vergriffen –
- Heft Nr. 024**
1977 Energiesparbuch für das Eigenheim
– vergriffen –
- Heft Nr. 025**
1977 Neue Technologien für die Baustellen der Zukunft.
Band III: Energieanlagenbau
– vergriffen –
- Heft Nr. 026**
1977 Verbundbetriebliche Kooperation in der Bauwirtschaft
- Heft Nr. 027**
1977 Industrialisierung des Ausbaues im Wohnungsbau
- Heft Nr. 028**
1977 Beschaffung von Planungs-, Management- und Bauleistungen
- Heft Nr. 029**
1977 Querschnittsbericht: Arbeitstechnik im Wohnungsbau.
Teilbericht: Bewehrungsarbeiten
- Heft Nr. 030**
1977 Neue Technologien für die Baustellen der Zukunft.
Band IV: Meeresbautechnik
– vergriffen –
- Heft Nr. 031**
1977 Neue Technologien für die Baustellen der Zukunft.
Band V: Wasserbau
- Heft Nr. 032**
1977 Neue Technologien für die Baustellen der Zukunft.
Band VI: Landtechnik
– vergriffen –
- Heft Nr. 033**
1977 Querschnittsbericht: Arbeitstechnik im Wohnungsbau.
Teilbericht: Innenputz
- Heft Nr. 034**
1978 Selbsthilfe-Bausätze.
Leistungsübersicht der Bausatz-Firmen
– vergriffen –
- Heft Nr. 035**
1978 Bericht I: Modulordnung.
Bericht II: Toleranzen und Passungen
- Heft Nr. 036**
1978 Auswirkungen der Baunachfrage
auf die Struktur der bauausführenden Wirtschaft
- Heft Nr. 037**
1978 Brandversuche an einem zum Abbruch bestimmten
viergeschossigen modernen Wohnhaus in Lehrte

